

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM OPTOELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV  
ORGANICKÝCH POLOVODIČŮ NA BÁZI FTALOCYANINŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ZDEŇKA MIKLÍKOVÁ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE  
FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# STUDIUM OPTOELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV ORGANICKÝCH POLOVODIČŮ NA BÁZI FTALOCYANINŮ

STUDY OF OPTOELECTRICAL PROPERTIES OF ORGANIC SEMICONDUCTOR THIN FILM  
LAYERS OF PHTALOCYANINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ZDEŇKA MIKLÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	<b>FCH-DIP0859/2014</b>	Akademický rok: <b>2014/2015</b>
Ústav:	Ústav fyzikální a spotřební chemie	
Student(ka):	<b>Bc. Zdeňka Miklíková</b>	
Studijní program:	Spotřební chemie (N2806)	
Studijní obor:	Spotřební chemie (2806T002)	
Vedoucí práce	<b>prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.</b>	
Konzultanti:		

### Název diplomové práce:

Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů na bázi ftalocyaninů

### Zadání diplomové práce:

1. Rešerše na téma použití organických materiálů v optoelektronických a optodielektrických prvcích
2. Studium optoelektrických a optodielektrických vlastností připravených organických materiálů
3. Interpretace naměřených výsledků volt-ampérových a impedančních charakteristik
4. Zpracování výsledků do diplomové práce.

### Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.2015

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

-----  
Bc. Zdeňka Miklíková  
Student(ka)

-----  
prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.  
Vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických materiálů na bázi ftalocyaninů, které mohou být využity jako aktivní vrstva fotovoltaických článků. Především jsou zde studovány vlastnosti tenkých aktivních vrstev PdPc a PdPc + IL na skleněných nebo keramických substrátech s hliníkovým kontaktem, které jsou připravovány materiálovým tiskem. Na připravených vzorcích byly nejprve změřeny volt-ampérové charakteristiky za tmy a světla a poté byla měřena impedanční spektra za tmy. Získané výsledky budou využity ke zlepšení vlastností a struktury fotovoltaických článků.

## **ABSTRACT**

Diploma thesis is focused on the study of optoelectric properties of thin layers of organic materials based on phthalocyanines, which can be used as an active layer of photovoltaic cells. Especially are studied the properties of the thin active layers of PdPc and PdPc + IL on the glass or ceramic substrates with aluminium contact, which are prepared by material printing here. On the prepared samples were first measured current-voltage characteristics in the dark and in the light and then were measured impedance spectrums in the dark. The received results will be used to improve the properties and structures of photovoltaic cells.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotovoltaika, solární článek, organický fotovoltaický článek, fotoaktivní materiály, struktury, tenké vrstvy, excitony, ftalocyaniny, fullereny, iontové kapaliny, sendvič, GAP, FET, OFET, metody nanášení, materiálový tisk, volt-ampérová charakteristika, impedanční spektroskopie, optická mikroskopie, profilometrie, elipsometrie.

## **KEYWORDS**

Photovoltaics, solar cell, organic solar cell, photoactive materials, structures, thin layers, excitons, phthalocyanines, fullerenes, ionic liquids, sandwich, GAP, FET, OFET, the application methods, material printing, volt-ampere characteristics, impedance spectroscopy, optical microscopy, profilometry, ellipsometry.

MIKLÍKOVÁ, Z. *Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů na bázi ftalocyaninů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 66 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

### **Poděkování:**

*Chtěla bych velmi poděkovat mému vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za jeho odborné rady, přátelský přístup, důslednost a také jeho čas.*

*Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mi v průběhu vypracovávání práce pomáhali, sdíleli se mnou cenné informace a podporovali mě a bez jejichž účasti by tato práce nemohla vzniknout.*

*Ještě jednou Vám všem mnohokrát děkuji.*

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>8</b>
2.1	Fotovoltaika .....	8
2.2	Solární články .....	8
2.2.1	Solární články první generace.....	8
2.2.2	Solární články druhé generace .....	9
2.2.3	Solární články třetí generace.....	9
2.2.4	Organické fotovoltaické články .....	9
2.2.5	Molekulární organické fotovoltaické články .....	10
2.2.6	Polymerní organické fotovoltaické články .....	12
2.2.7	Hybridní organické fotovoltaické články.....	13
2.3	Fotovoltaická přeměna v organických materiálech .....	14
2.3.1	Absorpce světla.....	15
2.3.2	Generace excitonů.....	15
2.3.3	Difúze excitonů.....	16
2.3.4	Separace náboje.....	17
2.3.5	Transport nosičů náboje k elektrodám .....	17
2.3.6	Odvedení nábojů elektrodami .....	18
2.3.7	Rekombinace nosičů náboje.....	18
2.4	Charakterizace fotovoltaických článků.....	18
2.4.1	Účinnost přeměny .....	18
2.4.2	Napětí naprázdno .....	19
2.4.3	Proud nakrátko .....	19
2.4.4	Faktor plnění .....	20
2.4.5	Dielektrické vlastnosti fotovoltaických článků.....	20
2.5	Fotoaktivní materiály používané v organické fotovoltaike.....	22
2.5.1	Komerčně využívané materiály .....	22
2.5.2	Diketo-pyrrolo-pyrroly .....	24
2.5.3	Ftalocyaniny.....	24
2.5.4	Iontové kapaliny.....	25
2.5.5	Fullereny .....	26
2.5.6	Ostatní materiály .....	27
2.6	Struktury využívané v organické fotovoltaike .....	27
2.6.1	Sendvičové struktury .....	28
2.6.2	Gapové struktury.....	28
2.6.3	Polem řízené organické tranzistory.....	29
2.7	Metody přípravy tenkých vrstev .....	29
2.7.1	Rotační nanášení (spin coating) .....	29
2.7.2	Nanášení pomocí kapek (drop casting).....	30
2.7.3	Materiálový tisk (material printing).....	31
2.7.4	Tepelné napařování (thermal evaporation) .....	32
2.7.5	Čepelové nanášení (doctor blade coating) .....	33
2.7.6	Elektroforetické nanášení (electrophoretic deposition) .....	33

<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>34</b>
3.1	Příprava vzorků.....	34
3.1.1	Předtisková příprava .....	34
3.1.2	Tisk vrstev.....	34
3.1.3	Potisková příprava .....	35
3.2	Studium geometrických a optických vlastností .....	37
3.2.1	Optická mikroskopie .....	37
3.2.2	Profilometrie .....	37
3.2.3	Elipsometrie .....	37
3.3	Měření stejnosměrných (volt-ampérových) charakteristik .....	38
3.4	Měření střídavých (impedančních) charakteristik .....	39
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE.....</b>	<b>41</b>
4.1	Studium geometrických a optických vlastností .....	41
4.1.1	Optická mikroskopie .....	41
4.2	Měření stejnosměrných charakteristik .....	41
4.2.1	Volt-ampérové charakteristiky sendvičových struktur .....	42
4.2.2	Volt-ampérové charakteristiky gapových struktur.....	46
4.3	Měření střídavých charakteristik .....	48
4.3.1	Impedanční spektroskopie sendvičových struktur .....	48
4.3.2	Impedanční spektroskopie gapových struktur .....	55
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>63</b>

# 1 ÚVOD

V současné době se elektrická energie na Zemi vyrábí dvěma hlavními způsoby, a to v tepelných elektrárnách, kde se spalují fosilní paliva (hnědé a černé uhlí) a v jaderných elektrárnách, kde se vše odehrává pomocí řízených štěpných reakcí. Nicméně oba dva způsoby výroby nevyužívají obnovitelných surovin a nejsou zcela vyhovující k životnímu prostředí. Díky získávání elektrické energie z tepelných elektráren, vzniká stále více nebezpečného  $\text{CO}_2$ , který se dostává do ovzduší. Vysoká koncentrace  $\text{CO}_2$  vede ke skleníkovému efektu a tím k oteplování povrchu Země a dalším nepříznivým důsledkům. Proto se v dnešní době hledají další možnosti výroby elektrické energie. Jedná se zejména o obnovitelné a nevyčerpatelné zdroje, které jsou zcela ekologické. Mezi tyto zdroje patří například energie vody, větru a také sluneční a geotermální energie.

K využití sluneční energie se před lety začaly používat anorganické solární (fotovoltaické) články. Anorganické články mají vysoké výrobní náklady díky drahému zpracování využívaných materiálů (zejména křemík). Proto je snaha využít organických polovodičových materiálů, které vytvářejí tenké vrstvy s požadovanými vlastnostmi a tisk vrstev byl přizpůsoben pro polovodičové materiály, ke splnění požadavků na dnešní elektroniku (jsou ohebné, lehké a jejich výroba je levná).

Anorganická fotovoltaika je v dnešní době prozatím účinnější než organická fotovoltaika a také dosahuje delší životnosti, což jsou základní požadavky pro nynější technologie (třetím aspektem je již zmiňovaná výrobní cena). Hlavním cílem je tedy hledání výkonnějších materiálů pro výrobu solárních článků a samotná optimalizace jejich struktury. Tato optimalizace struktury solárních článků může být provedena mnoha způsoby. Mezi ně patří například využití různých poměrů směsí a materiálů, užití mezivrstev, které napomáhají transportu náboje, použití rozličných vnitřních struktur, nebo povrchová ochrana propustnějšími materiály.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Fotovoltaika

V roce 1839 francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel poprvé vyrobil solární (fotovoltaický) článek a poté až o 100 let později se o tento výzkum začali zajímat lidé v Bellových laboratořích. Zde byl v roce 1953 připraven opravdu první solární článek, založený na monokrystalickém křemíku. Od té doby je fotovoltaika jedním z nejdynamičtěji se rozvíjejících průmyslových odvětví. [1, 2]

Jedná se o způsob výroby elektrické energie z přímé přeměny energie záření Slunce pomocí fotovoltaických (solárních) článků. Je tedy šetrný k životnímu prostředí (nezanechává jakékoliv škodliviny). [3]

### 2.2 Solární články

Fotovoltaické (solární) články jsou struktury fungující na principu fotovoltaického efektu, který patří mezi vnitřní fotoelektrické jevy (spolu s fotovodivostí). Stále nepoužívanějšími fotovoltaickými články jsou ty na bázi křemíku. V současné době je snaha o jejich nahrazení za levnější organické materiály. [4, 5]

#### 2.2.1 Solární články první generace

Solární články první generace se skládají z křemíkových desek, dosahujících vysokých účinností fotovoltaické přeměny. Účinnost těchto článků je v sériové výrobě 16 až 19 % (speciální struktury až 24 %), ale díky obtížné výrobě jsou drahé (300 až 500 USD/m<sup>2</sup>). Důležitý je podíl ceny na instalovaném výkonu Wp, který dosahuje u první generace 3,5 USD/Wp. Vysoká výrobní cena přiměla výrobce ke ztenčování použitého materiálu a k rozvoji alternativních technologií bez nutného řezání křemíkových ingotů jako např. destičky extrudované skrz šterbinu (EFG Shott Solar) nebo vytahování z taveniny mezi dvěma strunami (Evergreen Solar). Alternativou jsou také články z křemíkových kuliček, které vznikají žháním polykrystalických zrn (Spheral Solar). Existují i nové přístupy jako využití směrového leptání k novému způsobu dělení ingotů na tenké pásy (50 μm × 2 mm × 10 cm), které se nazývají „Silver cells“. Tyto články by mohly dosahovat stejné energetické doby návratnosti jako tenkovrstvé články. [1, 5, 6]

U solárních článků první generace byl prioritní požadavek na zvětšování plochy substrátu. Nejdříve se rozšířila výroba 5" článků (rozměry 125 mm × 125 mm), později se vyráběly 6" články (rozměry 156 mm × 156 mm). Poté byla výroba směrována k 9" článkům (rozměry 225 mm × 225 mm), ale od té se upustilo kvůli vysokým ztrátám v kabeláži. Proud těchto článků byl kolem 16 A, u 5" článků to bylo 5 A, tedy 10× vyšší ztráty v průřezích vodičů. [7]

Jak již bylo řečeno, solární články první generace se vyrábějí na křemíkových substrátech, pro které se používá anglické označení „wafer based“. Křemíkové substráty vznikají řezáním křemíkových ingotů. Zatímco nejdříve se články vyráběly z vrstev o tloušťkách 0,5 mm, v dnešní době se vyrábí z vrstev o tloušťkách 200 μm. Na vrstvu vysokou 220 μm se na výrobu spotřebuje 9 g křemíku, při produkovaní jednotkového výkonu 1 Wp. [7]

Solární články první generace z monokrystalického křemíku (m-Si) mají sytě modré až černé zbarvení a osmiúhelníkový tvar. Na povrchu je viditelná síť kovových vodičů, které tvoří horní kontakt. Tyto články mají teoreticky účinnost až 24 %, ale reálná účinnost je v rozsahu 14 až 16 %. Naopak články z polykrystalického křemíku (p-Si) jsou jasně modré, mají výraznou krys-

talickou strukturu a na povrchu je také viditelná síť kovových vodičů. Účinnost polykrystalických článků je nepatrně nižší, ale lépe dokáží proměňovat difúzní světlo a světlo přicházející z boku. [7]

### 2.2.2 Solární články druhé generace

Solární články druhé generace jsou založeny na tenkých vrstvách (thin films). Zde se tenké vrstvy skládají z amorfního nebo mikrokrytalického křemíku (případně křemíku-germania, křemíku-uhlíku nebo ze směsných polovodičů jako Cu, In, Ga, S, Se označovaných obecně jako CIS struktury), které na jednotku výkonu Wp vyžadují stokrát až tisíckrát méně křemíku než deskové články první generace. Účinnosti fotovoltaické přeměny jsou nižší, v sériové výrobě zhruba pod 10 %, a náklady na jednotku výkonu Wp se od článků první generace téměř neliší. Až tisíckrát menší množství křemíku v článcích druhé generace by mělo vést k významnému snížení ceny, ale potřebné vakuové technologie jsou drahé. [1, 5]

Nedávno byl objeven postup, jak nanášet vrstvy cyklopentasilanu z roztoku, které pak lze následným žháním převést na kvalitní amorfni nebo polykrystalický křemík. V budoucnu by se mohlo jednat o velmi významnou technologii. Výhodou článků druhé generace je možnost volby substrátu, na nějž se tenkovrstvé struktury deponují. V případě použití flexibilních materiálů (organické či textilní folie) se jejich použití rozšiřuje. [1, 5]

### 2.2.3 Solární články třetí generace

Solární články třetí generace směřují k cíli dosáhnout účinnosti nad tzv. Shockley-Queisserovu hranici. Shockley a Queissar v roce 1961 stanovili limit účinnosti přeměny sluneční energie u jednoduchých solárních článků na 31 %. [1]

Hlavním cílem je snaha o maximální zvýšení počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron-díra (tzv. proudový zisk), ale i maximální využití energie dopadajících fotonů (tzv. napěťový zisk). Ve výzkumu je pozornost věnována několika směrům:

- vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev),
- články s vícenásobnými pásy,
- články, využívající nosiče náboje pro generování většího množství páru elektron-díra,
- termofotovoltaická přeměna, kde absorber je současně i selektivně vyzařujícím radiátorem,
- termofotonická přeměna, kde absorber je nahrazen elektroluminiscencí,
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách,
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy,
- organické články, např. na bázi objemových heteropřechodů. [1, 5]

Vícevrstvé struktury (dvojvrstvé se nazývají tandemy) jsou komerčním příkladem pro dobře fungující články třetí generace, které plynule navazují na články druhé generace. Každá substruktura (p-i-n) absorbuje danou část spektra a maximalizuje se energetická využitelnost fotonů. [5]

### 2.2.4 Organické fotovoltaické články

Jedná se o články na bázi tenkovrstvých organických materiálů (organic dye). Výhodou je extrémní snížení nákladů na výrobu (až 100×). V současné době dosahují účinnosti 2 % a v laboratorních podmínkách 11 %, ale komerčně jsou zatím nedostupné. [7]

Organické polovodiče jsou bohaté na uhlík a jejich struktura je zodpovědná za adsorpci světla ve viditelné oblasti. Použití organických materiálů jako polovodičů, je pro komerční aplikace

relativně nové. Organické fotovoltaické články nabízí mnoho výhod, např. nízké výrobní náklady, tvoří tenké vrstvy, propouští světelné záření, jsou flexibilní, lehké, mohou být barevné či transparentní a v neposlední řadě se dají exponovat téměř na cokoliv (sklo, keramika, plast). [8]

### 2.2.5 Molekulární organické fotovoltaické články

Molekulární organické fotovoltaické články můžeme rozdělit do tří skupin:

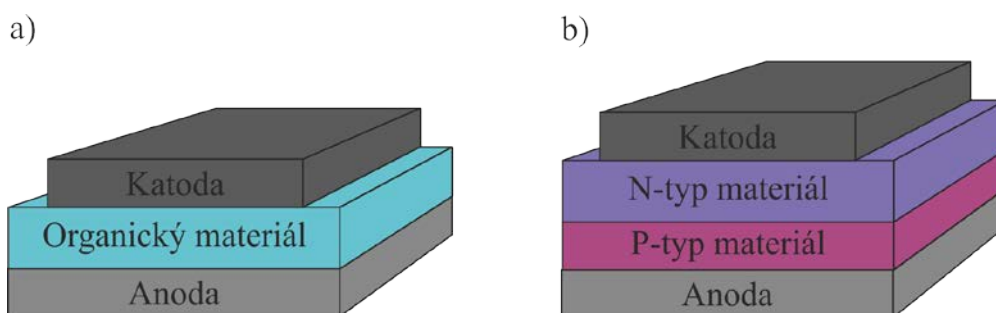
- organické solární články na bázi heteropřechodu,
- molekulární solární články na bázi objemového heteropřechodu,
- tandemové solární články.

#### a) Organické solární články na bázi heteropřechodu

Hlavní pozornost se ubírala k makrocyclickým molekulám jako jsou porfíny a ftalocyaniny. Tyto materiály jsou velmi perspektivní pro aplikace v tenkých vrstvách, které absorbují světlo, z důvodu vysokých hodnot absorpčních koeficientů (přes  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). [1]

Původně byly tyto články jednovrstvé, skládaly se pouze z jednoho polovodičového materiálu a jsou označovány jako Schottkyho typ (Schottkyho diody). Na rozhraní organický polovodič/elektroda dochází k separaci náboje a zde vzniká Schottkyho bariéra. Povrch druhé elektrody má ohmický charakter. Struktura tohoto typu článku je jednoduchá (*Obr. 1*), ale nevýhodou je, že nepokryje celou oblast viditelného záření, jeho fotoaktivní oblast je velmi malá. Další nevýhodou je, že oba vygenerované náboje prochází přes tentýž materiál a tím dochází k velkým ztrátám vlivem rekombinací náboje. [1]

Větší využití mají články, které generují náboj na rozhraní dvou rozdílných polovodičů. Takový typ je označován jako organický heteropřechod (*Obr. 1*). Heteropřechod využívá dvou materiálů s různou elektrickou afinitou a také různými ionizačními potenciály. Organické polovodiče preferují transport děr (p-typ) či elektronů (n-typ). První dvouvrstvé články byly vyráběny z elektron-transportních materiálů jako rodamin nebo trifenylmetan a materiálů transportující díry jako ftalocyanin nebo merocyanin. Tyto články byly schopny generovat fotonapětí do 200 mV a fotoproud  $10^{-8} \text{ A}$  při nízké intenzitě osvětlení. [1, 9, 10]



*Obr. 1 Uspořádání organického solárního článku: a) Schottkyho typu, b) Heteropřechodu*

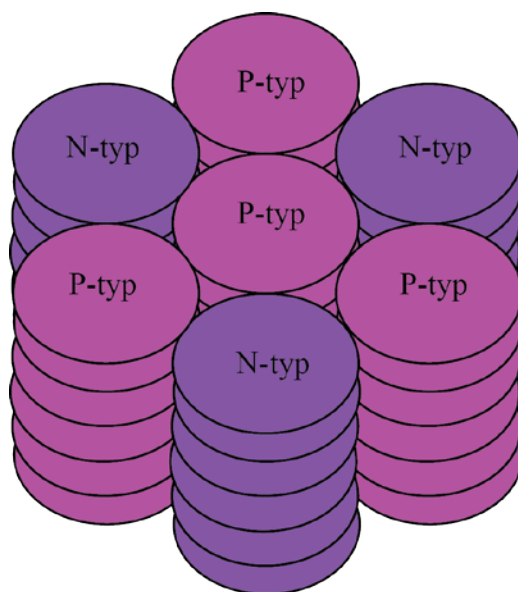
V solárních člancích první generace jsou vytvořeny excitony přímo absorpcí světla uvnitř objemu vrstvy a poté jsou transportovány k elektrodám pomocí rozdílu Fermiho hladin p-typu a n-typu polovodičů vlivem vnitřního elektrického pole. Zatímco v organickém polovodiči dojde k vytvoření excitovaného stavu pomocí absorpce světla, kde kladný a záporný náboj je k sobě volně vázaný, tzv. Frenkelův exciton. Pro generaci fotoproudu je důležité, aby rychlost rekombinace byla co nejmenší. Disociace excitonů zde může nastat v pastích či nečistotách. [1, 9]

Výkon těchto článků je určen účinností fotogenerace náboje a jeho transportu. Absorpce v příslušném materiálu musí nastat na rozhraní nebo uvnitř difúzní délky excitonu, aby byl mate-

riál schopen odvést náboj ke sběrné elektrodě a nedošlo k rekombinaci náboje. Difúzní délka excitonů je obvykle mezi 5 až 10 nm. K fotogeneraci náboje může dojít jen ve velmi tenké vrstvě v blízkosti organického heteropřechodu, kde dojde k absorpci jen malé části dopadajícího světla. Tato skutečnost významně limituje účinnost přeměny energie těchto článků. [1, 9, 10]

#### *b) Molekulární solární články na bázi objemového heteropřechodu*

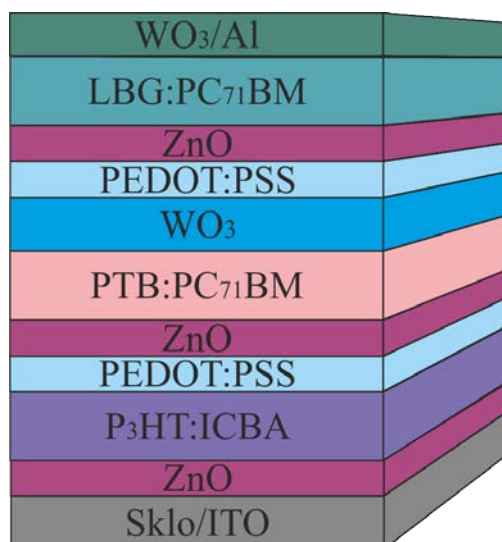
Využívá se odpaření směsné vrstvy např. organických pigmentů, za vzniku objemového heteropřechodu. V ideálním případě by se ve směsné vrstvě vytvořily fotogenerací elektrony a díry a ty byly vypuzeny do transportních vrstev na základě elektrických a vnitřních chemických potenciálů. Velmi výhodnou vlastností je pro nás jejich samoorganizace v morfologii vrstvy. Příkladem je použití diskových tekutých krystalů porfinu v článcích s objemovým heteropřechodem. Molekuly porfinu mají tvar disku a lze je skládat do válců (*Obr. 2*). Uvedený typ uspořádání umožňuje transport náboje vertikálním směrem uvnitř válce. Ideálně by se morfologie fotočlánků měla skládat ze separovaných válců materiálů transportujících elektrony a díry jednotlivých typů (v blízkém kontaktu). Absorpce fotonu uvnitř jednoho válce vede k disociaci excitonu na hraně dvou válců, to vede k transportu elektronu nebo díry k příslušné elektrodě v daném materiálu. [1]



*Obr. 2 Ideální morfologie tekutých krystalů porfinu v článcích s objemovým heteropřechodem*

#### *c) Tandemové solární články*

Tandemové solární články jsou vyrobeny z materiálů s rozdílným absorpčním spektrem. Tandemové články se skládají z vícevrstevných solárních článků (*Obr. 3*). Nejdříve se světlo absorbuje v horním článku, poté nízkenergetické fotony projdou skrz něj a následně jsou absorbovány v následných článcích. Princip tohoto článku je v tom, že každá vrstva absorbuje jinou část světelného spektra. Takové uspořádání zvyšuje celkový výkon článku a také napomáhá absorpci světelného záření v širších intervalech spektra. Jako rekombinační vrstva se zde většinou používá pH neutrální vrstva PEDOT:PSS (poly(3,4-etylendioxythiofen)-poly(4-styrensulfonyl)). Na začátku roku 2014 vědci připravili nový typ článku, který dosahuje účinnosti 8,4 % a je složen hlavně z WSe<sub>2</sub> (selenid wolframičitý). Použitý materiál vytváří tak tenkou vrstvu, že 95 % slunečního záření projde skrz a zbývajících 5 % je absorbováno. Jen absorbovaných 5 % se převádí na elektrickou energii. V druhé polovině roku 2014 vědci připravili článek s účinností 11,5 %. Principem je třívrstvý systém článku viz obrázek (*Obr. 3*). [1, 11 – 13]



Obr. 3 Struktura tandemového organického solárního článku (např. o účinnosti 11,5 %)

### 2.2.6 Polymerní organické fotovoltaické články

Polymerní organické fotovoltaické články můžeme také rozdělit do tří skupin:

- jednovrstvé polymerní solární články,
- solární články materiálů polymer-fulleren,
- solární články polymerních směsí a multivrstev.

#### a) Jednovrstvé polymerní solární články

Jednovrstvé polymerní články využívají fotovoltaického jevu na  $\pi$ -konjugovaných polymerech (první zmínky jsou z roku 1981). Zmíněné polymery jsou snadno převeditelné do roztoku, což je základem pro snadnou a levnou výrobu. První články byly připraveny z trans-polyetylénu ( $t\text{-CH}_X$ ), protože vykazoval podobné absorpční spektrum jako spektrum slunečního záření. Článek však vykazoval nízké hodnoty fotoproudu i faktoru plnění a jeho účinnost byla 0,1 % při sendvičové struktuře. Postupem času se zkoušely i další materiály, např. polythiofen (účinnost  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  %), PPV (poly-p-fenylenvinylén s účinností pod  $10^{-2}$  %). [1, 14]

Články, které jsou založeny jen na jednom druhu polymeru ovšem vykazují dva závažné problémy. Prvním problémem je ten, že absorpce světla negeneruje přímo nosiče náboje, ale primárně generovaným stavem je neutrální exciton, který má vazebnou energii několik desetin elektronvoltu. Z toho vyplývá, že elektrické pole, které se vytváří rozdílem výstupních prací elektrod nemusí stačit k ionizaci excitonu a tím generaci fotoproudu. Navíc rekombinaci vzniklého páru elektron-díra velmi podporují nečistoty, molekuly kyslíku nebo různé defekty uvnitř struktury materiálu. Druhým problémem je transport náboje, ten je ovlivněn sériovým odporem nosičů náboje, který snižuje faktor plnění a i přítomnost pastí snižuje hodnotu fotoproudu. Výzkum mnoha druhů  $\pi$ -konjugovaných polymerů ukázal, že v polymerech převládá transport děr, např. u PPV je elektronový proud velmi silně snižován pastmi. [1, 14]

Dopováním polymerů materiály, které mají vysokou afinitu k elektronům a podporují jejich transport, lze problémy s fotogenerací a transportem zmírnit. Takovými materiály jsou polymery dopované fullerenem. V těchto článcích je při fotoexcitaci donoru (polymeru) elektron převeden na akceptor (fulleren) a naopak. Hlavním cílem je poté minimalizování zachytávání nosičů náboje v pastích a jejich rekombinaci, to lze opět ovlivnit morfologií vzniklé vrstvy. Účinnost směsi polymer-fulleren pro fotoindukovaný přenos náboje se blíží 100 %. [1, 14]

### *b) Solární články materiálů polymer-fulleren*

Solární články materiálů polymer-fulleren se chovají jako silný elektronový akceptor. Tato vlastnost je způsobena trojnásobně degenerovanou LUMO hladinou, která je schopná pojmout až šest elektronů. Kompozity polymer-fulleren tedy kombinují vysokou účinnost přeměny energie a ultra rychlý transport náboje, což je činí velmi výhodnými materiály pro organickou fotovoltaiku. První články dosahovaly účinnosti přeměny jen 0,02 % a byly tvořeny postupným vrstvením MEH-PPV (Poly[2-metoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-fenylenvinylen]) a fullerenu. Články s objemovým heteropřechodem dosahují lepších výsledků než dvouvrstvé články, ale stále nedosahují přijatelných výsledků. Například články s poly-p-fenylenvinylen PDHEOPV-PCBM měly účinnost 0,93 %, články s MDMO-PPV-PCBM vykazovaly účinnosti 2,2 %, vrstva derivátu polythiofenu F8T2-PCBM dosahovala účinnosti 2,13 % a vrstva P3HT-PCBM vytvářela účinnost 4,9 %. V současné době je účinnost těchto článků více než 6 %. [1, 14]

Uvedené články již nemají problém s účinností fotogenerace náboje, ale se zpětným vyzářením absorbované energie v podobě fluorescence při nízkých koncentracích fullerenu. Tento problém spočívá v transportu náboje skrz aktivní vrstvu, potažmo koncentrace obou směsí musí být dostatečně vysoká, aby v aktivní vrstvě vznikla síťovaná struktura. To je ale problematické, protože fullereny mají tendenci krystalizovat již během nanášení vrstvy. Vzniklá situace se řeší přípravou modifikovaných fullerenu, kde do jejich struktury jsou přidávány funkční skupiny, které zlepšují rozpustnost v rozpouštědlech např. PCBM. [1, 14]

### *c) Solární články polymerních směsí a multivrstev*

Solární články polymerních směsí a multivrstev významně překonávají jednoplymní články, ale zaostávají za články sestávající ze směsí polymer-fulleren. Směsi podobných polymerů, které mají rozdílnou afinitu k elektronům, vytváří v celém článku objemový heteropřechod. Taková vlastnost je důležitá a žádaná, nicméně tyto články jsou stále méně výkonné než ostatní články založené na objemovém heteropřechodu. Vysokou afinitu polymerů k elektronům lze vytvořit pomocí substituce postranního řetězce skupinami, které jsou schopny vázat elektrony např. kyanoskupiny. Nebo ji lze vytvořit díky kopolymerizaci monomeru polymeru s molekulami s vysokou afinitou k elektronům např. pyridin. [1]

V současnosti se výzkum ubírá směrem ke zlepšení morfologie vrstev polymerů. Použité směsi mají sklon k fázové segregaci do separovaných domén díky nízké entropii mísení. Ideální je vytvoření vnitřní sítě uvnitř směsné vrstvy polymerů, kde absorpce světla nastává v difúzní délce excitonů na rozhraní mezi dvěma fázemi. Poté se generují nosiče náboje uvnitř separovaných domén. Během depozice lze měnit morfologii směsi polymerů změnou koncentrace polymeru nebo rozpouštědla, změnou depozičních podmínek nebo podepoziční úpravou např. žíháním při různých teplotách. [1]

## **2.2.7 Hybridní organické fotovoltaické články**

Hybridní organické fotovoltaické články začleňují anorganické materiály do organických. Je snaha využít všechny výhody obou materiálů. Příkladem jsou články složené z kompozitů konjugovaných polymerů a polovodičových nanokrystalů včetně kvantových teček. Struktura kvantových teček umožňuje jednoduché nanášení z roztoku. [1]

Dalšími typy těchto článků jsou články na bázi objemového heteropřechodu, které jsou vyrobeny z kompozitů konjugovaných polymerů a TiO<sub>2</sub> materiálu(oxid titaničitý). Nanokrystalický TiO<sub>2</sub> má dobré transportní vlastnosti elektronů a vodivostní pás tohoto materiálu se nachází pod hladinou LUMO dalších organických polovodičů. [1]

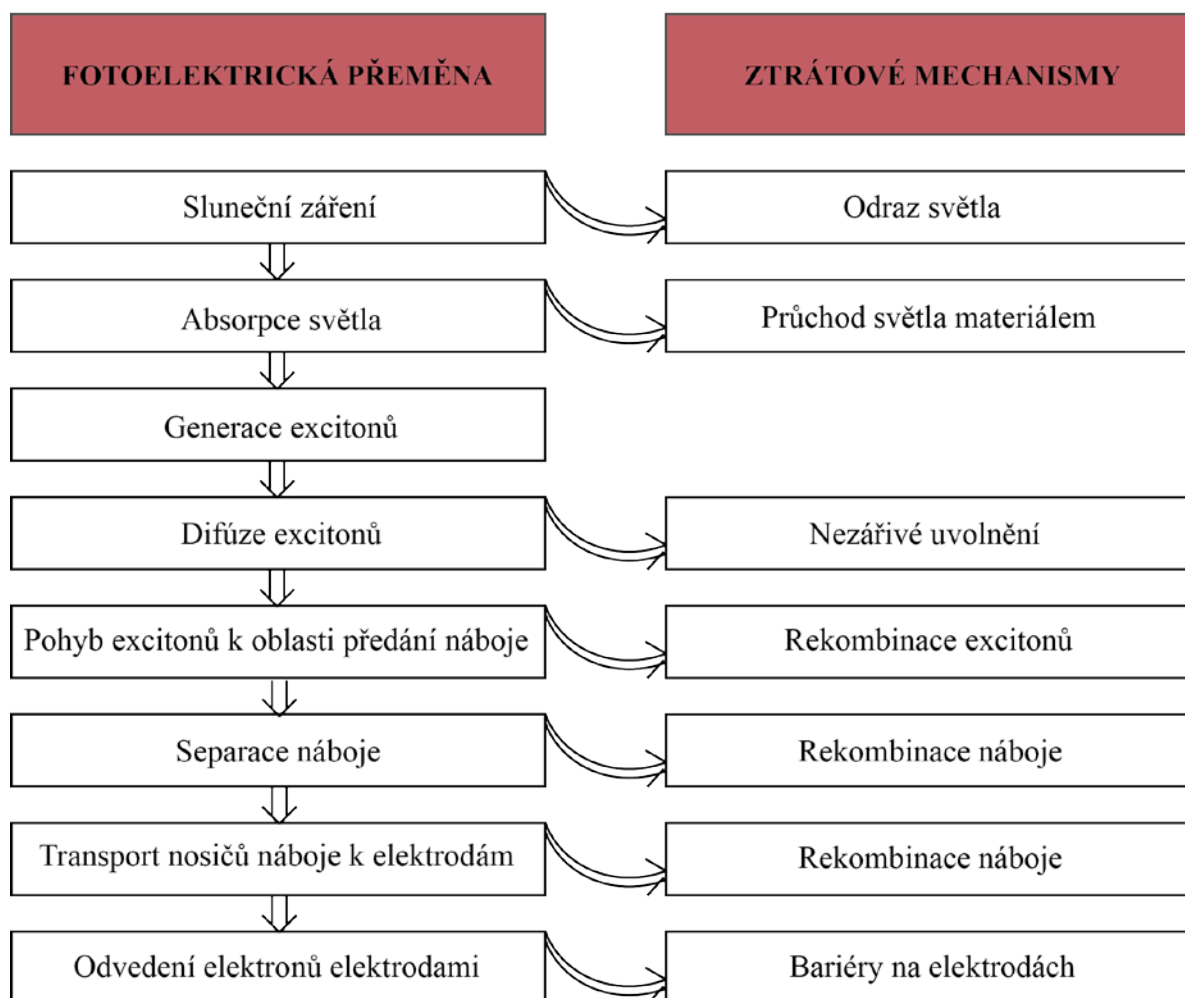


Posledním typem hybridních článků jsou DSSC (dye sensitized solar cells nebo-li Grätzelovy) články. V roce 1991 u nich byla naměřena nejvyšší účinnost 10 %. Články využívají nanočástice  $\text{TiO}_2$  a organická barviva obsahující ruthenium. Nevýhoda těchto článků spočívá v kapalném elektrolytu, který může způsobovat korozi elektrod, desorpci barviva nebo sám elektrolyt může unikat ven z článku. Z tohoto důvodu se od nich v současné době upouští. [1, 15]

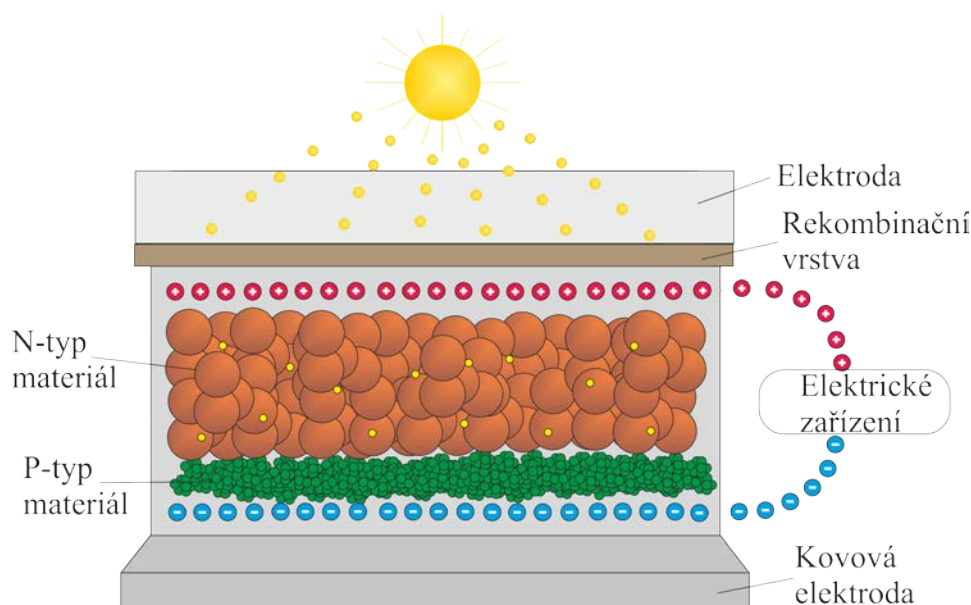
## 2.3 Fotovoltaická přeměna v organických materiálech

Působením světelného záření na fotovoltaický článek resp. na daný materiál, v něm vzniká fotoelektrický jev, díky němuž se v obvodu vytváří elektrický proud (*Obr. 5*). Vznikající proud je přímo úměrný ploše fotovoltaického článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. Důležitá je také tloušťka vrstvy, pokud je tloušťka materiálu vyšší (alespoň 100 nm), tak zvyšuje účinnost absorpce záření. Opačný efekt má difúzní rozsah excitonů, ten vyžaduje nižší tloušťku vrstvy. U polymerních materiálů cca 10 nm. [4, 8, 9, 16]

Pokud na fotovoltaický článek dopadá sluneční záření, tak část tohoto záření se od materiálu odrazí, část jím projde a část je jím absorbována. Absorpce záření vede ke generaci nosičů náboje pomocí disociace excitonů. Poté jsou vzniklé nosiče náboje shromažďovány v blízkosti elektrod a následně jsou odvedeny do vnějšího elektrického obvodu. Všechny tyto děje jsou spojeny se ztrátami a proto je třeba najít vhodné řešení, jak těmto ztrátám předcházet a učinit tak organický fotovoltaický článek co nejúčinnější. [1, 8, 9, 16]



Obr. 4 Stručný přehled fotovoltaické konverze a jejích ztrát



Obr. 5 Fotovoltaická přeměna v organických materiálech

### 2.3.1 Absorpce světla

Jak již bylo řečeno, pokud na fotovoltaický článek dopadá sluneční záření, tak část tohoto záření se od materiálu odrazí, část jím projde a část je jím absorbována. Absorbováno je jen to záření, které způsobuje přechod elektronů z nižší energetické hladiny na vyšší hladinu. Zmiňovaná skutečnost je dána Lambertovým zákonem (zákon absorpce světla) a je vyjádřena jako

$$-\frac{dl}{l} = b \, dx, \quad (1)$$

kde  $l$  je hustota světelného toku ve vzdálenosti  $x$  od místa, kde světlo vstupuje do látky,  $b$  je Napierův koeficient. Při absorpci světla se absorbují fotony a následně se z nich generují excitony, kde elektrony přecházejí z valenčního pásu do vodivostního pásu. [1, 9]

Většina organických materiálů absorbuje jen malou část dopadajícího světla, protože jejich šířka zakázaného pásu je příliš velká. Při dopadajícím slunečním záření by organické materiály měly mít potřebnou šířku zakázaného pásu cca 1,1 eV (110 nm), při které by absorbovaly 77 % záření. Ve skutečnosti má většina organických materiálů šířku zakázaného pásu vyšší než 2,0 eV (600 nm), při které absorbují záření jen na cca 30 %. Z tohoto důvodu musí být vrstva organického materiálu tenká, proto nízký náboj nosiče a nízká pohyblivost excitonů požaduje tloušťku cca 100 nm. Absorpční koeficient organických materiálů je mnohem větší než u křemíku, takže i při tloušťce vrstvy 100 nm je možné díky využití reflexního zadního kontaktu dosáhnout absorpce 60 až 90 %. [1, 8, 9, 16]

### 2.3.2 Generace excitonů

Fotogenerace excitonů (nosičů náboje) v organických materiálech je způsobena různými procesy, a to vlastní fotovodivostí (Autoionizační proces) nebo nevlastní fotovodivostí.

#### a) Vlastní fotovodivost

Do metastabilního stavu se excitují molekuly pomocí jednofotonové nebo vícefotonové ( $n$ ) absorpce světla [1]

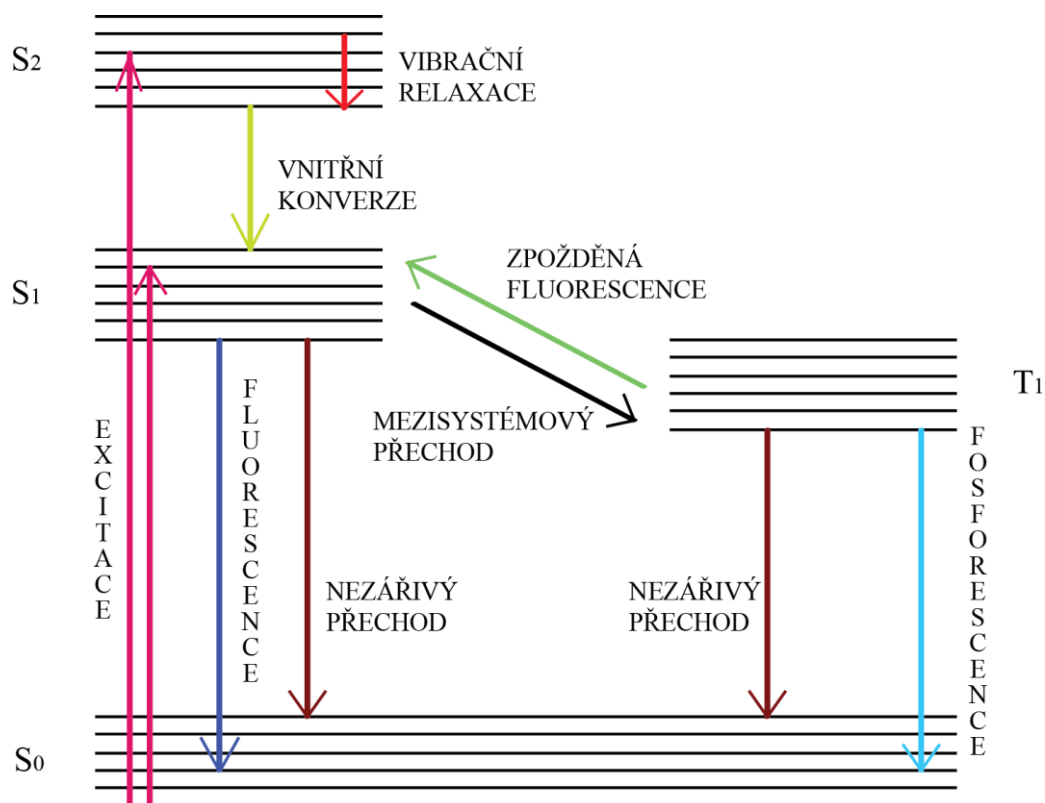




Molekula při absorpci světla přechází ze singletového stavu  $S_0$  na jiný stav (např.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $T_1$ ), který má vyšší energii, tzv. metastabilní stav (Obr. 6). Výtěžek reakce snižují hlavně dva procesy. Dané stavy mohou zanikat bez generace volných nosičů náboje a dodaná energie ze světelného záření může být uvolněna fluorescencí (přechod singlet-singlet) nebo fosforescencí (přechod triplet-singlet). Nebo v těchto stavech může dojít k disociaci metastabilního stavu na volné nosiče náboje [1]



Uvedená rovnice zahrnuje autoionizaci excitovaného stavu, při které vzniká volný elektron a lokalizovaná díra. Také dochází k termalizaci volného elektronu za vzniku coulombicky vázaného páru elektron-díra pomocí rychlého neelastického rozptylu a následně podléhá vázaný pár termické disociaci za vzniku volných nosičů náboje. [1]



Obr. 6 Jablonského diagram

#### b) Nevlastní fotovodivost

U nevlastní fotogenerace převládají jednofotonové absorpce světla. Pro tento typ je charakteristická lineární závislost kvantového výtěžku na intenzitě excitačního záření. V uvedeném případě energie fotonu nestačuje k dosažení metastabilního stavu  $M^*$  a generace volných nosičů náboje musí probíhat jinak a to: [1]

- disociací excitonů interakcí s objemovými defekty,
- disociací excitonů se zachycenými nosiči náboje,
- excitonovou disociací na rozhraní elektroda-krystal.

#### 2.3.3 Difúze excitonů

V ideálním případě všechny excitony proudí do donor-akceptorové mezifáze a následně dosahují elektrod. Ve skutečnosti k tomu však často nedochází, protože elektrody mohou být od excitonů

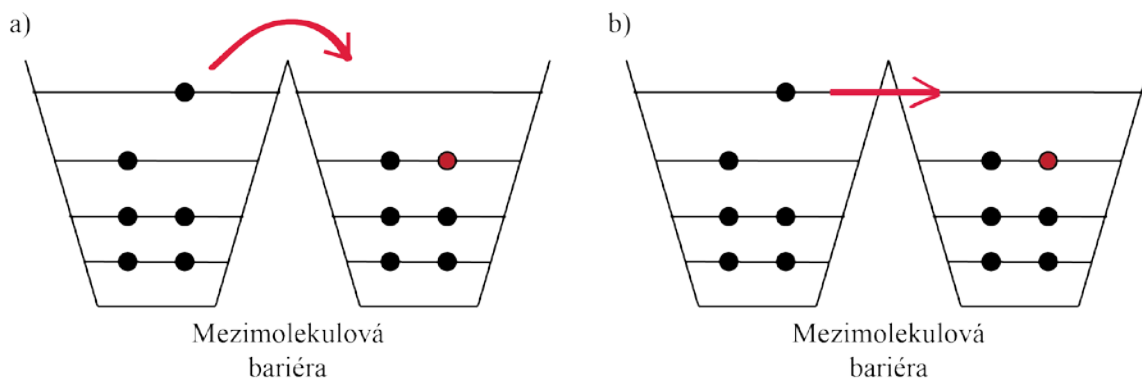
velmi vzdálené. Disociační vzdálenost musí být přinejmenším stejná jako tloušťka vrstvy materiálu, aby docházelo k postačující absorpci. Akční radius difuze excitonů je cca 10 nm u polymerů a pigmentů. Ve skutečnosti často dochází k rekombinaci excitonů a tak je energie dodaná fotonem vynaložena zbytečně. [1, 8, 9, 16]

### 2.3.4 Separace náboje

K separaci náboje dochází mezi materiály s dostatečně rozdílným ionizačním potenciálem nebo elektronovou afinitou, na rozhraní mezi materiály polovodič/kov nebo polovodič/příměs. Takovéto materiály se dělí na dva typy. První typ materiálů má záporný náboj a je tedy akceptorem elektronů (převládají uvnitř materiálu elektrony) a druhým typem materiálů je donor elektronů, tedy má kladný náboj (převládají uvnitř materiálu díry). Pokud zde není dostatečný rozdíl ionizačního potenciálu nebo elektronové afinity, tak exciton může přejít do materiálu se zakázaným pásem, který je méně široký než donoru nebo akceptoru a nedojde tak k rozdělení náboje v excitonu. Může také rekombinovat bez přispění náboje do fotoproudu. V případě, že podmínky jsou splněny, tak exciton generuje nosiče náboje (elektron, díra) a ty následně putují k donoru a akceptoru. [1, 8, 9]

### 2.3.5 Transport nosičů náboje k elektrodám

V organických látkách existují slabé mezimolekulární vazby van der Waalsova typu. Interakční energie, ovlivňující výměnu nábojů mezi sousedními molekulami, jsou díky těmto silám malé. Transport náboje může být tedy uskutečněn pomocí elektronového přeskočku nebo tunelového efektu (Obr. 7). [1, 8, 9]



Obr. 7 Princip: a) elektronového přeskočku, b) tunelového efektu

Princip elektronového přeskočku spočívá v tom, že nosiče náboje se pohybují od jedné molekuly ke druhé přeskoky přes bariéry. Jejich střední volná dráha je určena vzdáleností přeskokových míst. K těmto přeskokům přes bariéry musí elektron získat energii  $E_B$ , která je rovna několika desetinám eV ve slabě vázaných molekulárních systémech. Pravděpodobnost přeskočku je dána Boltzmanovým faktorem

$$\exp\left(-\frac{E_B}{k_B T}\right), \quad (4)$$

a pro pohyblivost nosičů náboje platí

$$\mu = \frac{ed^2}{k_B T} \exp\left(-\frac{E_B}{k_B T}\right), \quad (5)$$

kde  $d$  je šířka bariéry a  $E_B$  je její výška. [1, 8, 9]

Transport náboje můžou zpomalit (nebo omezit samotný náboj) interakce s atomy nebo s jinými náboji. Transport je také ovlivňován rekombinací v průběhu přesunu k elektrodám. Především pokud jsou tentýž materiálem přesunovány elektrony i díry. [1, 8, 9]

### 2.3.6 Odvedení nábojů elektrodami

Díry jsou sbírány na elektrodě s velkou výstupní prací např. ITO, a elektrony jsou sbírány na elektrodě s malou výstupní prací, pokud není přiloženo vnější napětí. Aby mohly náboje přejít na elektrodu s nízkou výstupní prací, musí překonat potenciálovou bariéru tenké oxidové vrstvy. Pro náboje může kontakt kovu s polovodičem vytvořit překážku, kterou nemohou okamžitě překonat. Napětí naprázdno  $U_{OC}$ , které se generuje procesem disociace excitonů a přechodem nosičů náboje na elektrody nebo fotoinjekcí náboje z elektrody, závisí na výši rozdílu výstupních prací elektrod. [1, 8, 9]

### 2.3.7 Rekombinace nosičů náboje

Rekombinace nosičů náboje je nechtěný proces a může nastat ve všech částech fotovoltaiické přeměny. Proto je snaha zabránit rekombinacím náboje, ale některé typy rekombinací jsou samovolné a nedá se jím zabránit. Přímá rekombinace náboje nastává při přechodu volného elektronu z vodivostního pásu do valenčního pásu na volnou energetickou hladinu. Uvedený typ rekombinace je málo pravděpodobný, protože vyžaduje, aby elektron i díra byly na stejném místě. [1]

Pravděpodobnější je tedy nepřímá rekombinace, která probíhá přes donorovou hladinu a nastává tehdy, pokud donorová hladina je v počátečním stavu volná. Na volné hladině se poté může zachytit elektron z vodivostního pásu a jakmile se zde objeví díra, tak elektron skočí do valenčního pásu a následně dojde k rekombinaci nábojů. Může také nastat rekombinace náboje přes akceptorovou hladinu. Zde elektron přejde z akceptorové hladiny do valenčního pásu a rekombinace poté nastává při přechodu elektronu z vodivostního pásu na akceptorovou hladinu. Zmíněný typ nepřímé rekombinace je dvoustupňový a nevyžaduje, aby elektron a díra byly současně na jednom místě. Různé nedokonalosti v krystalech, příměsové atomy nebo ionty a další objemové nebo povrchové defekty vytváří pomocné energetické hladiny, na kterých probíhá rekombinace s vyšší intenzitou. [1]

## 2.4 Charakterizace fotovoltaiických článků

### 2.4.1 Účinnost přeměny

Účinnost fotovoltaiické přeměny  $PCE$  je základním parametrem pro výrobu fotovoltaiických článků a následně elektrické energie. Je definována jako poměr vystupující energie z fotovoltaiického článku a vstupující energie ze Slunce. Účinnost fotovoltaiických článků je dána pomocí

$$PCE = \frac{U_{OC} I_{SC} FF}{P_{light}}, \quad (6)$$

kde  $U_{OC}$  je napětí naprázdno,  $I_{SC}$  je proud nakrátko,  $FF$  je faktor plnění a  $P_{light}$  je výkon dopadajícího záření. Při měřeních pomocí solárních simulátorů s AM1.5 spektry využíváme rovnice

$$PCE_{AM1.5} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} M = \frac{U_{OC} I_{SC} FF}{P_{IN}} M, \quad (7)$$

kde  $P_{OUT}$  je výstupní výkon fotovoltaického článku,  $P_{IN}$  je vstupní výkon záření solárního simulátoru,  $M$  je faktor vyjadřující spektrální nesoulad mezi výstupním spektrem solárního simulátoru a standardním AM1.5 spektrem. Při měření se solárními simulátory se používají kovové halogenidové lampy s  $M \approx 0,76$  nebo xenonové lampy s  $M \approx 0,9$ . Účinnost závisí na intenzitě slunečního záření a na teplotě samotného článku. [17 – 19]

## 2.4.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno  $U_{OC}$  je maximální napětí fotovoltaického článku při nulovém proudu. Po ozáření článku světlem jsou generovány volné nosiče náboje a přebytek jejich energie zaniká interakcemi s mřížkou (fonony), kde se ohřívají. Poté jsou nosiče náboje ve svých hladinách v rovnováze a následně jsou rekombinovány. Hustota nosičů náboje je dána Fermiovými distribucemi pro elektrony a díry (platí pro ozářené polovodiče). Elektronová hustota je dána pomocí

$$n_e = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{FC}}{k_B T}\right), \quad (8)$$

a děrová hustota je vyjádřena jako

$$n_h = N_V \exp\left(-\frac{E_{FV} - E_V}{k_B T}\right), \quad (9)$$

kde  $N_C$  je efektivní hustota energetického stavu vodivostního pásu,  $N_V$  je efektivní hustota energetického stavu valenčního pásu,  $E_C$  je energie vodivostního pásu,  $E_V$  je energie valenčního pásu,  $E_{FC}$  je energie elektronové kvazi-Fermiovy hladiny,  $E_{FV}$  je energie děrové kvazi-Fermiovy hladiny. Výsledná rovnice je tedy [10, 17, 18, 20, 21]

$$n_e n_h = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{FC} - E_{FV}}{k_B T}\right). \quad (10)$$

Horním limitem pro napětí naprázdno je tedy tento rozdíl mezi kvazi-Fermiovými hladinami elektronů a děr. Pro fotovoltaické články na bázi tenkých vrstev je vestavěný elektrický potenciál hlavním parametrem přenosu a sběru nosičů náboje. Vnitřní potenciál polovodiče je dán napětím naprázdno a má nižší hodnotu než vestavěný elektrický potenciál a přitom k němu konverguje při nízkých teplotách. Smícháním konjugovaných polymerů s fullereny, do kompozitní aktivní vrstvy, dochází k výrazné změně napětí naprázdno. Pro výpočet  $U_{OC}$  je využívána následující rovnice

$$V_{OC} = S_4 A_{OX} + S_4 (\varphi_{M1} - A_{OX}) - S_1 E_{red(A)} - S_2 (\varphi_{M2} - E_{red(A)}), \quad (11)$$

kde  $E_{red(A)}$  je redukční potenciál akceptoru,  $A_{OX}$  je oxidační potenciál donoru,  $\varphi_{M1}$  a  $\varphi_{M2}$  jsou výstupní práce katody,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  jsou korelační konstanty. [10, 17, 18, 20, 21]

## 2.4.3 Proud nakrátko

Proud nakrátko  $I_{SC}$  je proud procházející fotovoltaickým článkem, v případě že napětí uvnitř článku je rovno nule, přičemž tento proud je maximální možný proud článku. Objemová heterogenní směs napomáhá překonat omezení materiálů s nízkou pohyblivostí nosičů náboje dvojvrstvého systému. Objemová heterogenní struktura s velkou hustotou rozhraní donor/akceptor poskytuje fotoindukované vytvoření volných nosičů náboje a následně jejich přenos k elektrodám. Směs bez fázové separace PCBM zvyšuje stupeň interakcí mezi řetězcí konjugovaného polymé-

ru. Např. směs MDMO-PPV s PCBM v poměru 1:4 má stejnou popř. nepatrně nižší pohyblivost děr oproti čistému MDMO-PPV. [10, 17, 18, 20, 22]

Zvýšením pohyblivosti nosičů náboje v polymerním polovodiči je zvýšen proud nakrátko a účinnost fotovoltaiické přeměny. Volné nosiče náboje jsou uvnitř materiálu urychlovány a difundovány k elektrodám. Jejich hnací silou je rozdíl výstupních prací elektrod, který poté vytváří vestavěné elektrické pole v aktivní vrstvě. V aktivní vrstvě se volné elektrony pohybují v molekulách metanofullerenů a díry se pohybují v konjugovaném polymeru. Pohyb volných nosičů náboje po polymerním řetězci je rychlý, kdežto pohyb mezi polymerními řetězci je pomalý, protože vyžaduje elektronové přeskoky. Z tohoto důvodu směs polovodiče typu p a n s větší pohyblivostí nosičů náboje např. fulleren, má i vyšší účinnost fotovoltaiické přeměny. [10, 17, 18, 20, 22]

Proud nakrátko je závislý na mnoha faktorech:

- ploše fotovoltaiického článku,
- počtu absorbovaných fotonů,
- spektru světelného záření,
- optických vlastnostech fotovoltaiického článku,
- účinnosti absorpce fotovoltaiického článku. [22]

#### 2.4.4 Faktor plnění

Faktor plnění je parametr článku, který závisí na proudu nakrátko a napětí naprázdno.  $FF$  představuje elektrickou účinnost fotovoltaiického článku. V praxi se používá aproximace fotovoltaiických článků obvodem, který obsahuje sériový odpor a paralelní odpor. Diodový proud v článku je dán rovnicí

$$\ln\left(\frac{(I_v + I_{sc})}{I_0} - \frac{(U - IR_s)}{I_0 R_p} + 1\right) = \frac{q(U - IR_s)}{nk_B T}, \quad (12)$$

kde  $I$  je procházející proud,  $I_0$  je saturační proud,  $R_s$  je sériový odpor,  $R_p$  je paralelní odpor,  $n$  je faktor ideality diody,  $k_B T/q$  je teplotní potenciál (při pokojové teplotě cca 0,025 V),  $I_v$  je vstupní proud při vstupním napětí  $U$ . Pokud se do článku vloží tenká vrstva LiF mezi katodu a fotoaktivní vrstvu, tak se dosáhne zlepšení kontaktu, následně zmenšení sériového odporu a tím ke zvýšení napětí naprázdno a také zvýšení faktoru plnění. [10, 17, 18, 20, 23]

#### 2.4.5 Dielektrické vlastnosti fotovoltaiických článků

Impedance  $Z$  je dána součtem rezistance  $R$  a reaktance  $X$  elektronických prvků, při průchodu harmonického střídavého proudu dané frekvence. Ze závislosti impedance na frekvenci střídavého proudu lze určit fázový posun mezi napětím a proudem, zkonstruovat náhradní obvod elektrického prvku nebo charakterizovat vlastnosti prvku. Hodnota impedance je vyjádřena jako

$$Z = R + jX, \quad (13)$$

kde  $j$  je imaginární jednotka. Absolutní hodnota impedance je dána jako

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (14)$$

a fázový posun je dán

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R}, \quad (15)$$

kde  $R = |Z| \cos \varphi$  a  $X = |Z| \sin \varphi$  jsou zobrazeny v rovině komplexních čísel. Ideální rezistor má pouze reálnou část rezistance při výpočtu impedance a její hodnota nezávisí na frekvenci střídavého proudu [17, 24]

$$|Z_R| = R. \quad (16)$$

Reaktance se dělí na indukanci  $X_L$  (kladnou reaktanci) a kapacitanci  $X_C$  (zápornou reaktanci). Induktance je reaktance cívky, která závisí na frekvenci, a proto je zde proud opožděn za napětím o určitý fázový úhel. Ideální cívka (induktor) je složen pouze z imaginární části impedance, s fázovým posunem  $90^\circ$  podle

$$|Z_L| = X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (17)$$

kde  $\omega$  je fázová rychlost,  $L$  je indukčnost cívky,  $f$  je frekvence střídavého proudu. Kapacitance je reaktance kondenzátoru, kde naopak napětí je opožděno za proudem o určitý fázový úhel. Ideální kondenzátor je složen pouze z imaginární části impedance, s fázovým posunem  $-90^\circ$  podle

$$|Z_C| = X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (18)$$

kde  $C$  je elektrická kapacita kondenzátoru. [17, 24]

Pokud má induktance a kapacitance v obvodu součástky stejné hodnoty, tak se tato vlastnost nazývá rezonance a fázový posun je  $0^\circ$ . Impedance má v sériovém zapojení cívky a kondenzátoru hodnotu rezistance a v paralelním zapojení cívky a kondenzátoru se hodnota impedance zvyšuje. [17, 24]

Pro měření a charakterizaci paralelních obvodů je vhodné použít místo impedance admitanci, která vyjadřuje vodivost pro harmonický střídavý proud a definuje se jako

$$Y = G + jB, \quad (19)$$

kde  $G$  je konduktance,  $B$  je susceptance. Konduktance je frekvenčně nezávislá reálná část admitance a susceptance je frekvenčně závislá imaginární část admitance. Pro velikost admitance platí

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad (20)$$

a fázový posun platí

$$\varphi = \arctan \frac{B}{G}, \quad (21)$$

kde  $G = |Y| \cos \varphi$  a  $B = |Y| \sin \varphi$  jsou zobrazeny v rovině komplexních čísel. Fázový posun admitance je opačný k fázovému rozdílu impedance. Ideální cívka má tedy fázový posun  $-90^\circ$  a ideální kondenzátor má fázový posun  $90^\circ$ . Mezi impedancí a admitancí platí

$$Z = R_s + jX_s = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_p + jB_p} = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} - j \frac{B_p}{G_p^2 + B_p^2}, \quad (22)$$

$$Y = G_p + jB_p = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - j \frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2}, \quad (23)$$

$$D = \frac{R_s}{X_s} = \frac{G_p}{B_p}, \quad (24)$$

kde  $R_S$  je sériová rezistance,  $X_S$  je sériová reaktance,  $G_P$  je paralelní konduktance,  $B_P$  je paralelní susceptance a  $D$  je ztrátový faktor. [17, 24]

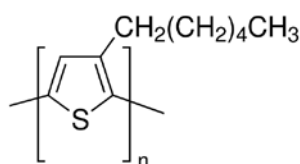
## 2.5 Fotoaktivní materiály používané v organické fotovoltaice

### 2.5.1 Komerčně využívané materiály

Zde je uvedeno několik důležitých materiálů, které se používají při komerční výrobě fotovoltaických článků.

#### a) $P_3HT$

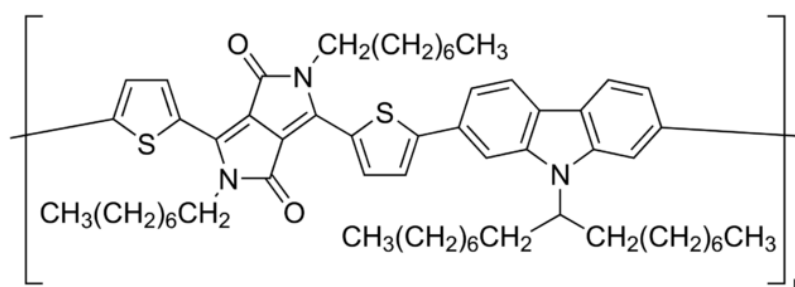
$P_3HT$  neboli Poly(3-hexylthiopen-2,5-diyl) je polymerní látka, která obsahuje  $\pi$ -konjugované vazby (Obr. 8) a chová se jako polovodič typu p.  $P_3HT$  dodávaný firmou Sigma Aldrich má  $M_n$  mezi 54 000 a 75 000 g/mol. Za běžných podmínek se jedná o pevnou, dráždivou látku s teplotou tání 238 °C.  $P_3HT$  materiál má hladinu HOMO = 5 eV a LUMO = 3 eV. Rozpustný je nejčastěji v chloroformu. Používá se v organických solárních člancích, OFET tranzistorech a OLED a PLED světlo emitujících diodách. [17, 25]



Obr. 8 Struktura  $P_3HT$  [25]

#### b) PCBTDP

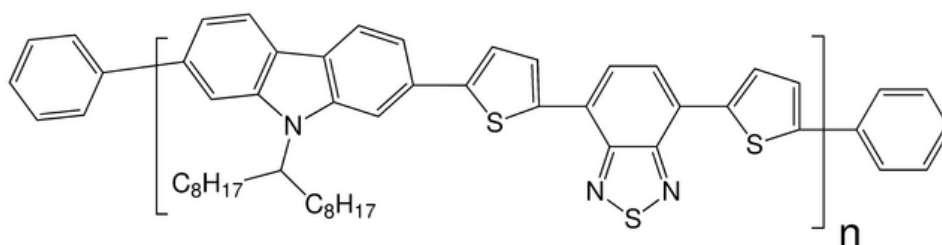
PCBTDP neboli Poly[*N*-90-heptadecanyl-2,7karbazol-*alt*-3,6-bis(thiopen-5-yl)-2,5-dioctyl-2,5-dihydropyrol[3,4]pyrol-1,4-dion] je polymerní látka, která se využívá ve fotovoltaice (Obr. 9). PCBTDP dodávaný firmou Sigma Aldrich má  $M_n$  mezi 10 000 a 50 000 g/mol. PCBTDP materiál má hladinu HOMO = 5,4 eV a LUMO = 3,9 eV. [17, 26]



Obr. 9 Struktura PCBTDP [26]

#### c) PCDTBT

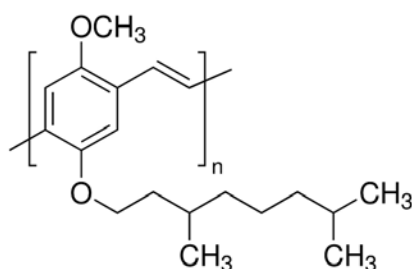
PCDTBT neboli Poly[*N*-9'-heptadecanyl-2,7-karbazol-*alt*-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazol)], Poly[[9-(1-octylonyl)-9H-karbazol-2,7-diyl]-2,5-thiofendiyl-2,1,3-benzothiadiazol-4,7-diyl-2,5-thiofendiyl] je polymerní látka, která se využívá ve fotovoltaice (Obr. 10). PCDTBT dodávaný firmou Sigma Aldrich má  $M_n$  mezi 20 000 a 100 000 g/mol. Teplota tání této látky je 270 až 300 °C. PCDTBT materiál má hladinu HOMO = 5,5 eV a LUMO = 3,6 eV. Používá se v organických solárních člancích a OFET tranzistorech. [17, 27]



Obr. 10 Struktura PCDTBT [27]

d) MDMO-PPV

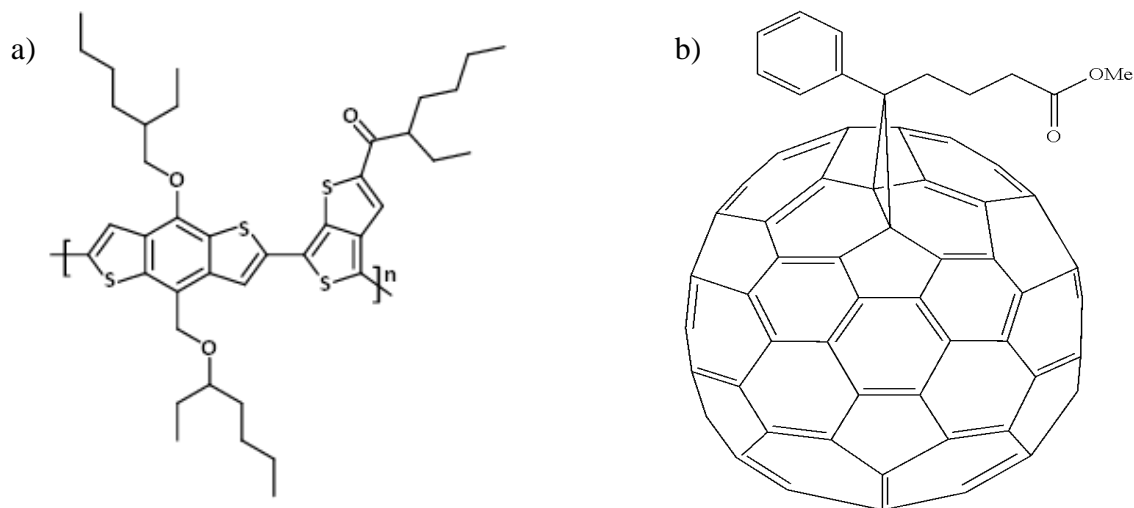
MDMO-PPV neboli Poly[2-metoxi-5-(3',7'-dimetyloctyloxy)-1,4-fenylenvinylen] je polymerní látka, která se využívá ve fotovoltaice (Obr. 11). MDMO-PPV dodávaný firmou Sigma Aldrich má  $M_n$  přibližně 120 000 g/mol. MDMO-PPV materiál má hladinu HOMO = 5,4 eV a LUMO = 3,2 eV. Rozpustný je například v toluenu, xylenu, THF, chloroformu, chlorbenzenu, cyklohexanonu. Používá se v organických solárních článcích, OFET tranzistorech a OLED světlo emitujících diodách. [17, 28]



Obr. 11 Struktura MDMO-PPV [28]

e) PBDTTT-C

PBDTTT-C neboli Poly[(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-benzo(1,2-b:4,5-b')dithiofen)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiofen)-2,6-diyl] je polymerní látka (Obr. 12). PBDTTT-C má přibližně  $M_n$  vyšší než 23 000 g/mol. PBDTTT-C materiál má hladinu HOMO = 5,1 eV a LUMO = 3,4 eV. Uvedený materiál se velmi často kombinuje s PC<sub>71</sub>BM, aby měl vhodnější vlastnosti pro použití ve fotovoltaice. PC<sub>71</sub>BM neboli [6,6]-fenyl C<sub>71</sub> metyl ester kyseliny butarové. [17, 29, 30]

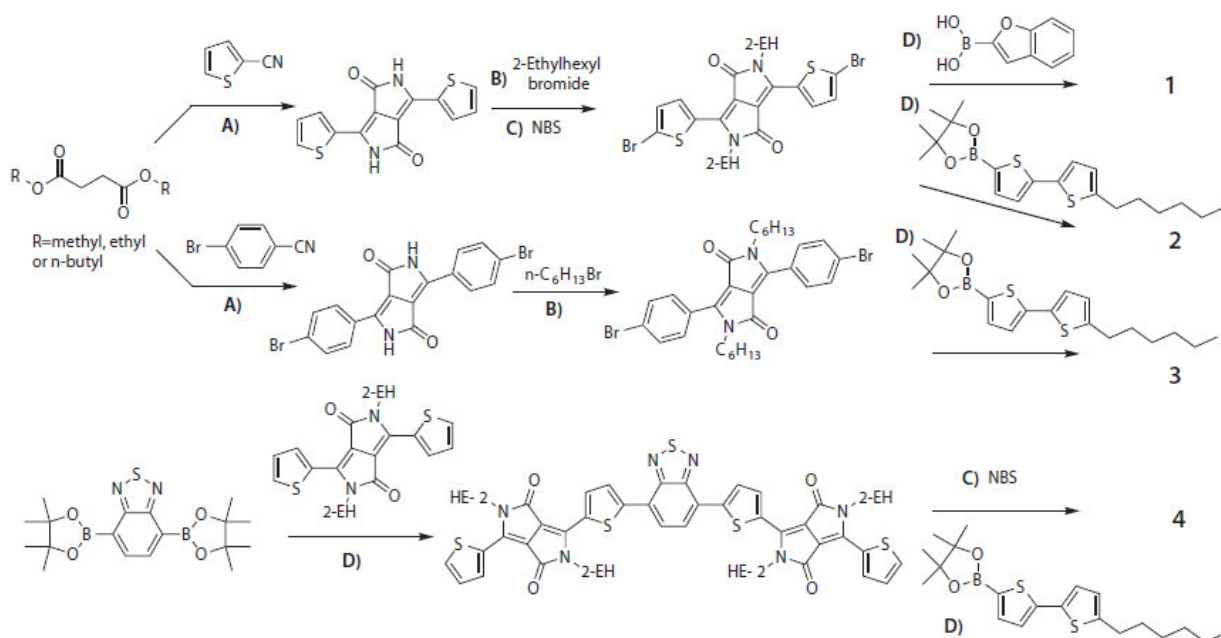


Obr. 12 Struktura: a) PBDTTT-C [29], b) PC<sub>71</sub>BM [30]



### 2.5.2 Diketo-pyrrolo-pyrroly

DPP neboli diketo-pyrrolo-pyrroly se využívají k výrobě organických solárních článků s barvivou se zvýšenou citlivostí na sluneční světlo (*Obr. 13*). Barviva mohou být založena na furanu. Solární články s barvivou založené na rutenatých polypyridylových komplexech zvyšují citlivost na sluneční světlo a dosahují účinnosti až 12 %. DPP materiály mají hladinu HOMO  $\approx 5,1$  eV a LUMO  $\approx 3,4$  eV. DPP obsahuje  $\pi$ -konjugované vazby a používá se v organických solárních článcích, OFET tranzistorech a OLED světlo emitujících diodách. Mají velké využití díky své chemické stabilitě ve všech svých modifikacích. [17, 31]

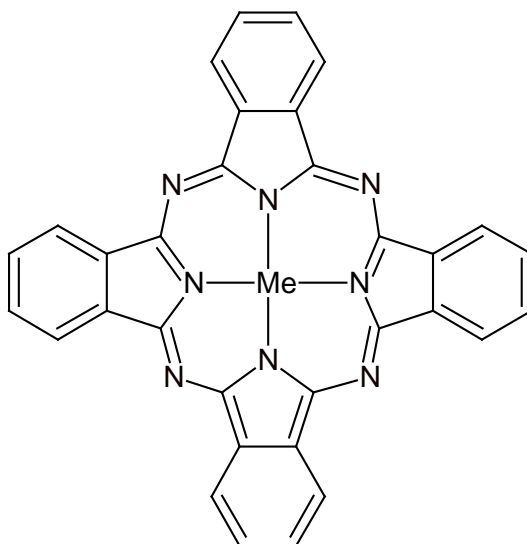


*Obr. 13* Syntéza derivátů DPP [31]

### 2.5.3 Ftalocyaniny

Ftalocyaniny jsou komplexy s centrálním atomem (*Obr. 14*). Centrálním atomem Me často bývá přechodný kov jako např. Zn, Fe, Ni, Mn, Co, Cu, Pd, nebo Al. Me atom je obklopen čtyřmi pyrrolovými dusíky a čtyřmi přemostěními azo-dusíkovými atomy. Jsou to organické polymerní materiály, mají rozsáhlý delokalizovaný  $\pi$ -konjugovaný systém. Díky tomuto delokalizovanému systému jsou ftalocyaniny schopny absorbovat viditelné světlo a být použity jako ambipolární vodivé materiály. Ftalocyaniny s přechodnými kovy mají vynikající magnetické vlastnosti. Mezi jejich hlavní výhody patří světelná stabilita, tepelná stabilita (nevykazují rychlou degradaci do 400 °C), chemická stabilita, odolnost vůči roztokům a katalytická aktivita. Ftalocyanin je tmavě modrý pigment, který vzniká jako vedlejší produkt při přípravě z ftalimidu a acetanhydridu. [17, 24, 32]

Používají se jako pigmenty, poté v OLED světlo emitujících diodách, OFET tranzistorech, solárních článcích, fotosenzitizérech, plynových senzorech, magnetickém zobrazování rakoviny, fotodynamické terapii rakoviny, katalyzátorech pro palivové články, magnetických přepínačích, zařízeních s jednou molekulou a spintronice. Mezi nejvyužívanější ftalocyaniny patří ftalocyanin hliníku – AlPc, zinku – ZnPc, paladia – PdPc, mědi – CuPc a niklu – NiPc. [17, 24, 32]



Obr. 14 Základní struktura ftalocyaninů s centrálním atomem kovu Me [24]

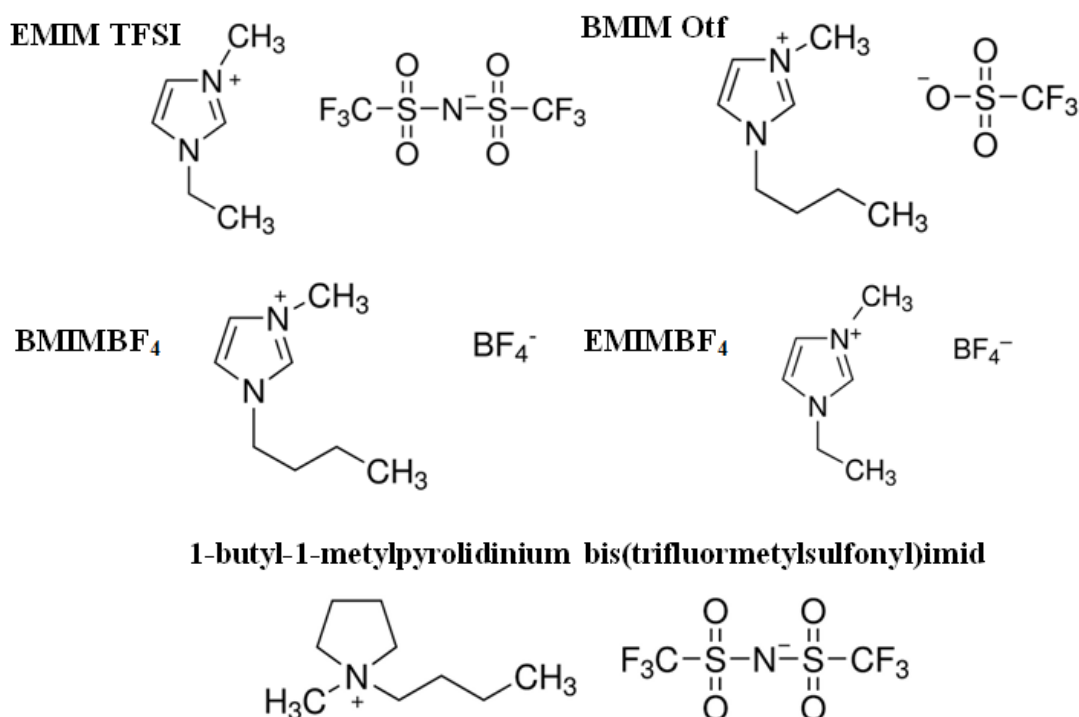
#### 2.5.4 Iontové kapaliny

Iontové kapaliny jsou látky, které jsou složené z organického kationtu a anorganického nebo organického aniontu. Jejich bod tání je nižší než 100 °C a za laboratorních teplot jsou často kapalné. Mezi jejich hlavní výhody patří nízká toxicita, nehořlavost, nulová tenze par, vysoká termostabilita, unikátní solvatační vlastnosti, široké teplotní rozmezí, ve kterém jsou kapalné, jsou lehce připravitelné a v neposlední řadě jsou šetrné k životnímu prostředí. Sloučeniny, které mají iontový charakter a zároveň nízký bod tání jsou soli, ve kterých nenastává koordinace mezi kationtem a aniontem. [33 – 35]

Zmiňované soli se nazývají sloučeniny s objemovými ionty (kation i anion), ve kterých náboj není lokalizován. Mezi takové kationty patří látky obsahující kvartérní atom dusíku (imidazoliové, amoniové, pyridinové, thiazolové a pyrrolidiniové soli), fosforu (fosfoniové soli) nebo síry (sulfoniiové soli). Mezi anionty patří nejčastěji trifluormetansulfonát, trifluoracetát, tetrachloroaluminát, tetrafluoroborát a další. Podmínkou stability pro iontové kapaliny je, aby byl atom nesooucí náboj, plně substituován. [33 – 35]

Používají se jako kapalné prostředí pro chemické reakce, jako náhrada těkavých organických rozpouštědel a v elektrochemii. Iontové kapaliny jsou dobrými rozpouštědly pro širokou škálu organických i anorganických materiálů a plynů jako H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, přičemž se chovají jako vysoce polární nekoordinovaná rozpouštědla. Jsou mísitelné s většinou organických rozpouštědel, kde v dvoufázovém systému se chovají jako nevodná polární alternativa. Ve vodě mohou být hydrofobní iontové kapaliny využity jako mísitelná polární fáze. Využití těchto kapalin často zvyšuje aktivitu, stabilitu a selektivitu katalytických reakcí. [33 – 35]

Iontové kapaliny jsou například následující: EMIM TFSI neboli 1-etyl-3-metylimidazoliumbis(trifluormetylsulfonyl)imid, BMIM Otf neboli 1-butyl-3-metylimidazolium trifluorometansulfonát, BMIMBF<sub>4</sub> neboli 1-butyl-3-metylimidazolium tetrafluoridboritý, EMIMBF<sub>4</sub> neboli 1-etyl-3-metylimidazolium tetrafluoridboritý a 1-butyl-1-methylpyrrolidinium bis(trifluormetylsulfonyl)imid (Obr. 15). [36 – 40]



Obr. 15 Struktury vybraných iontových kapalin [36 – 40]

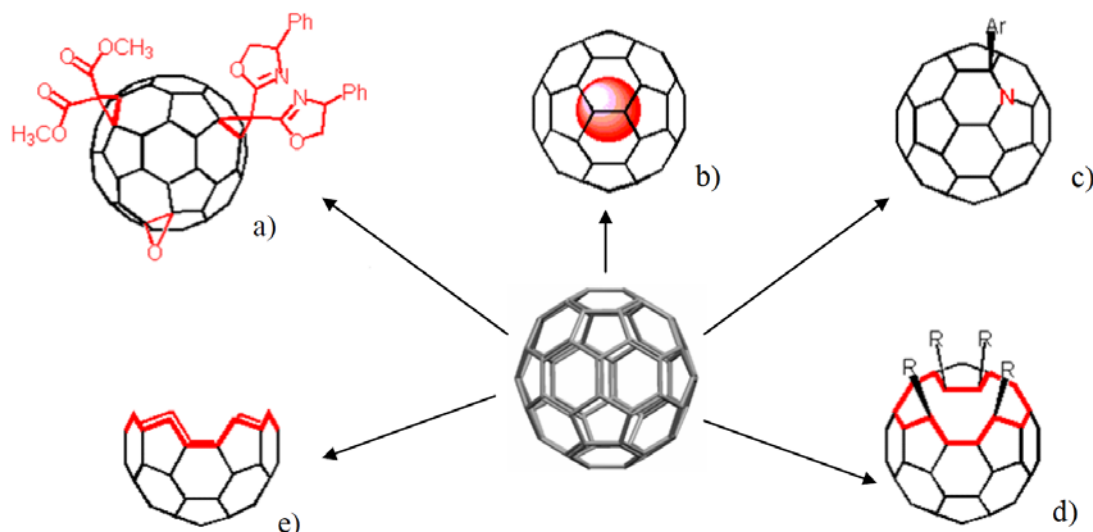
## 2.5.5 Fullereny

Fullereny jsou třetí alotropickou modifikací uhlíku. Jde o kondenzované polycyklické klecovité struktury, složené ze sudého počtu uhlíkových atomů, poskládaných přednostně z pěti- a šestiúhelníků. Atomy uhlíku a vazby tvoří vrcholy a hrany mnohostěnu. Studium jejich struktury vedlo k formulování pravidla o izolovaných pětiúhelnících. Uvedené pravidlo říká, že stabilní jsou pouze ty fullereny, u nichž se ve struktuře nenachází dva pětiúhelníky vedle sebe. Zároveň předpokládá minimum násobných vazeb v těchto pětiúhelnících. Nejmenším systémem splňující toto pravidlo je ikosahedrální struktura  $C_{60}$ . Pevné fullereny  $C_{60}$  se skládají z extrémně pevných pseudosférických molekulových vazeb na způsob slabých van der Waalsových sil. Díky těmto silám je fullerén  $C_{60}$  považován za pevný lubrikant, který může být používán za nízkého tlaku (kapalný lubrikant nelze za těchto podmínek použít). [24, 41]

Fullereny nejsou reaktivní díky stabilním grafitovým vazbám. Jejich reaktivita lze zvýšit přidáním aktivních skupin na jejich povrch. Jsou také nerozpustné v mnoha rozpouštědlech. Rozpustné jsou jen např. v chlorbenzenu a jiných organických rozpouštědlech, kde jsou i velmi dobře modifikovatelné. Jsou to organické, polymerní, toxické, dráždivé materiály. Jejich nejvýznamnější vlastností je supravodivost. Fullereny jsou velmi dobrými příjemci elektronů a jsou velmi dobře fotovodivé.  $C_{60}$  je poměrně silně elektronegativní molekula, kterou lze snadno redukovat, ale obtížně oxidovat. U tištěných fotovoltaických článků se využívá vlastností fullerenů (rozpuštění fullerenu v chlorbenzenu a tím vytvoření donor-akceptorní směsi, která je fotovodivá). Nejčastěji se používá fullerén  $PC_{71}BM$  neboli [6,6]-fenyl  $C_{71}$  metyl ester kyseliny butarové (Obr. 12). [24, 41]

Pro jejich schopnost mnohonásobných adičních reakcí (obzvlášť schopnost vychytávat volné radikály) se fullereny používají k vývoji léčiv, které by sloužily jako léky proti stárnutí. Z toho vyplývá i použití jako antioxidanty v nejrůznějších materiálech, včetně polymerů. Mnoho vodičských polymerů na bázi fullerenů má uplatnění v elektronice, optice a jejich nejdůležitější uplatnění jako nanomateriály. Fullereny se používají v biofarmaceutice, jako prostředky osobní péče,

jako vodivé polymery a polymery pro elektroniku, speciální a komoditní polymery a jako uhlíkové povrchy. [24, 41]



Obr. 16 Typy fullerénových derivátů: a) exohedrální deriváty fullerénů, b) endohedrální komplexy, c) heterofullereny, d) sloučeniny s otevřenou sférou, e) degradační produkty fullerénů [41]

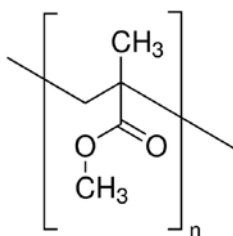
## 2.5.6 Ostatní materiály

### a) ITO

ITO je směsný oxidu india a cínu ( $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ ). Je vysoce elektricky vodivý, tenký, stálý a transparentní. Vykazuje malý elektrický odpor, dobrou adhezi ke sklu, odolává vlhkosti a UV záření. Je chemicky velmi stabilní, mechanicky odolný. Chová se, jako degenerovaný polovodič typu N. V organických fotovoltaických článcích se využívá jako anoda. [24]

### b) PMMA

PMMA neboli polymethylmetakrylát (Obr. 17) je kopolymer akrylonitrilu s metylmetakrylátem (vzniká reakcí acetonu s kyanovodíkem). Jedná se o termoplast. Jeho polymerací v bloku se vyrábí organické sklo (plexisklo). PMMA má vynikající fotostabilitu a propustnost světla, odolává vodě, má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti. Nanášení PMMA na fotovoltaický článek se provádí materiálovým tiskem a slouží k mechanické ochraně článku. [24]



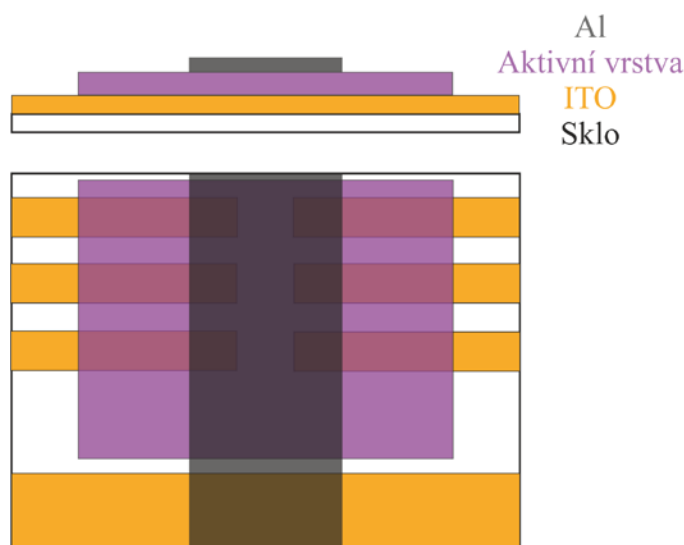
Obr. 17 Struktura PMMA [42]

## 2.6 Struktury využívané v organické fotovoltaice

Existuje mnoho struktur, jak uspořádat materiály v organickém fotovoltaickém článku. Nejdůležitějším aspektem je funkčnost a účinnost článku. V současné době se hledá co nejvýhodnější a nejúčinnější struktura uspořádání v článku. Mezi nejvyužívanější elektrodové struktury se řadí sendvičové a gapové struktury a speciální struktura uspořádání článku FET.

### 2.6.1 Sendvičové struktury

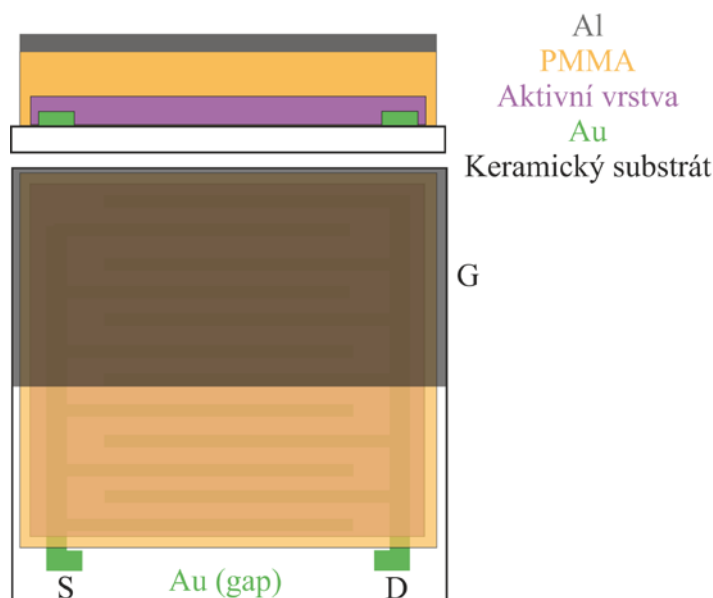
Paralelní uspořádání elektrod neboli sendvičové má elektrody uspořádané rovnoběžně. Fotovoltaické články sendvičové struktury se skládají z více struktur např. 5, 10. Každá vrstva zde přitom plní jinou funkci. Horní elektroda z hliníku plní funkci hlavní elektrody, tedy i při malé změně proudu nebo napětí ovlivňuje zbývající část článku. Jednoduchá sendvičová struktura je zobrazena na obrázku níže (Obr. 18). [43]



Obr. 18 Jednoduché schéma sendvičové struktury

### 2.6.2 Gapové struktury

Rovinné uspořádání elektrod neboli gapové má elektrody uspořádané v jedné rovině. Gapové struktury obsahují interdigitální elektrody (zdrojová – „source“, výstupní – „drain“). Průřez elektrod by měl být co největší, to je ovlivněno tloušťkou vrstvy, a vzdálenost mezi elektrodami by měla být co nejmenší. Jednoduchá gapová struktura je zobrazena na obrázku níže (Obr. 19). Gapové struktury jsou základem pro FET tranzistory, kde jsou doplněny další elektrodou (hradlová – „gate“), kterou lze řídit proud mezi interdigitálními elektrodami. [43]



Obr. 19 Jednoduché schéma gapové struktury

### 2.6.3 Polem řízené organické tranzistory

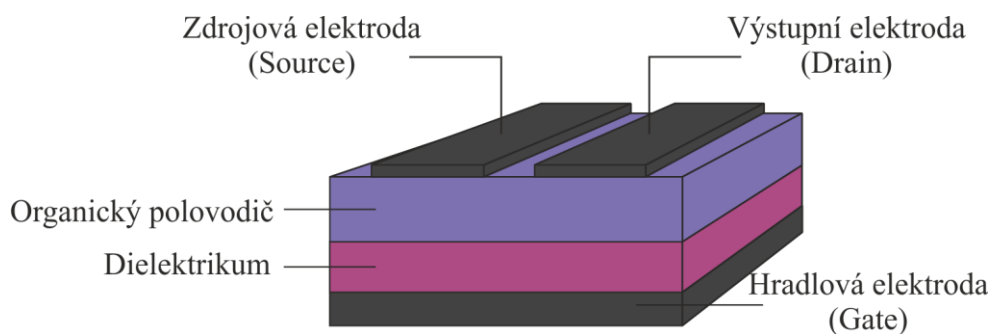
Polem řízené organické tranzistory neboli OFET (organic field-effect transistor) tvoří podskupinu tranzistorů. Základní činností tranzistoru je transformace odporu. Podle principu činnosti se dělí na bipolární a unipolární (FET). [4]

Bipolární tranzistor je řízen pomocí elektrického proudu připojeného na bázi. Vedení proudu je zprostředkováno pomocí nosičů náboje a to jak děrami, tak elektrony. Z tohoto důvodu je tento tranzistor nazýván bipolární. Bipolární tranzistor je schopen pomocí řídicí elektrody neboli báze měnit odpor řízeného obvodu mezi emitorem a kolektorem. Proud protékající kolektorem může být až tisíckrát větší než proud tekoucí bázi a proto bipolární tranzistor pracuje jako zesilovač proudu (malé změny vstupního proudu vyvolávají velké změny výstupního proudu). [4]

Unipolární tranzistor je řízen pomocí příčného elektrického pole. Aplikací napětí na hradlovou elektrodu se vytváří volné nosiče náboje. Na proud těchto nosičů působí příčné elektrické pole hradlové neboli řídicí elektrody, to způsobí zúžení vodivého kanálu v polovodiči. Vodivý kanál se vytváří mezi zdrojovou a výstupní elektrodou důsledkem elektrostatických sil a jeho napětí zajišťuje pohyb nosičů a tím reguluje výstupní proud. Unipolární tranzistor využívá ke své činnosti pouze většinové nosiče jednoho druhu a proto se nazývá unipolární. [4]

Na obrázku níže (*Obr. 20*) je zobrazena jednoduchá struktura polem řízeného organického tranzistoru v uspořádání s horními kontakty. Uvedený tranzistor je vícevrstevná polovodičová součástka, která je tvořena substrátem, dielektrikem (kondenzátor, izolant), organickým polovodičem a třemi elektrodami (zdrojová – „source“, výstupní – „drain“ a hradlová – „gate“). [4]

Mezi nejdůležitější kritéria u OFET patří prahové napětí a pohyblivost nosičů náboje, to jsou rozhodující faktory, které určují taktovací frekvenci tranzistorů a tím i jejich aplikace (pohyblivost nosičů není tak velká jako u křemíku). [4]



*Obr. 20 Jednoduché schéma OFET struktury*

## 2.7 Metody přípravy tenkých vrstev

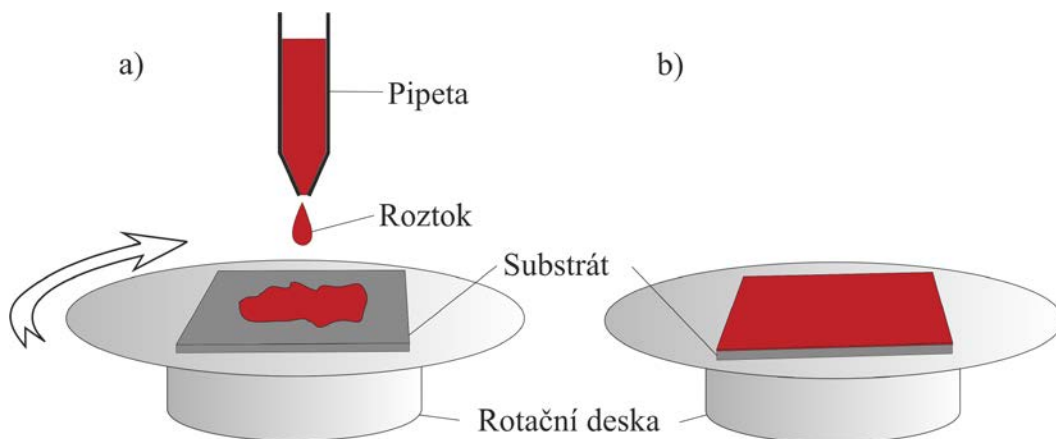
Pro přípravu fotovoltaiických článků může být použito mnoho nových i starých technologií pro nanášení tenkých vrstev. Tenké vrstvy mohou být nanášeny na článek pomocí rotačního nanášení, nanášení pomocí kapek, materiálovým tiskem, napařováním, čepelovým nanášením a elektroforetickým nanášením. V praxi se využívají všechny typy nanášení a záleží na materiálu, který se nanáší a materiálu, z kterého se skládá fotovoltaiický článek, který typ nanášení je nejvhodnější.

### 2.7.1 Rotační nanášení (spin coating)

Rotační nanášení neboli „spin coating“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu vypařování rozpouštědla z roztoku, kdy byl roztok nanesen na substrát při současném otáčení substrátu (*Obr. 21*). Rotační nanášení vykazuje nižší krystalinitu připravovaných poly-



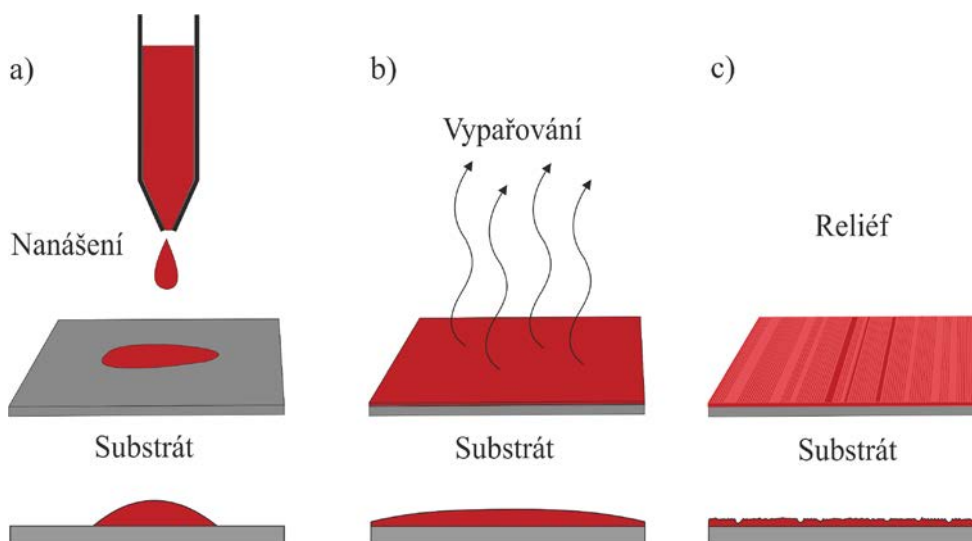
merných vrstev a s tím související nižší pohyblivost volných nosičů náboje, ale trvá poměrně krátkou dobu a je pro průmysl levná. Možné řešení nízké krystalinity je rotační nanášení v parách žíhaného rozpouštědla, které je kombinací zahřívání par rozpouštědla a klasického rotačního nanášení. Je podobně finančně a časově náročná jako klasické rotační nanášení a vrstvy mají podobnou krystalinitu, ale mají vyšší pohyblivost volných nosičů náboje. Obecně kvalita a výška vrstvy u rotačního nanášení závisí jak na počtu otáček, tak na objemu roztoku, který je na substrát vkládán, tak na viskozitě a koncentraci roztoku a těkavosti rozpouštědla. [17, 44, 45]



Obr. 21 Schéma rotačního nanášení: a) nanášení vrstvy, b) rozprostření vrstvy

### 2.7.2 Nanášení pomocí kapek (drop casting)

Nanášení pomocí kapek neboli „drop casting“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu vypařování rozpouštědla z kapky roztoku, která je nanesena na substrát (Obr. 22). Opět zde nastává problém nízké krystalinity tenkých vrstev a to může být vyřešeno nanášením kapek v parách zahříváného rozpouštědla, která je kombinací zahřívání par rozpouštědla a klasického nanášení kapek. Je podobně finančně a časově náročná jako klasické nanášení pomocí kapek, ale vrstvy mají mnohem vyšší krystalinitu a pohyblivost volných nosičů náboje. Nevýhodou této metody nanášení je, že zde není možnost kontroly výšky tenké vrstvy. [17, 45]



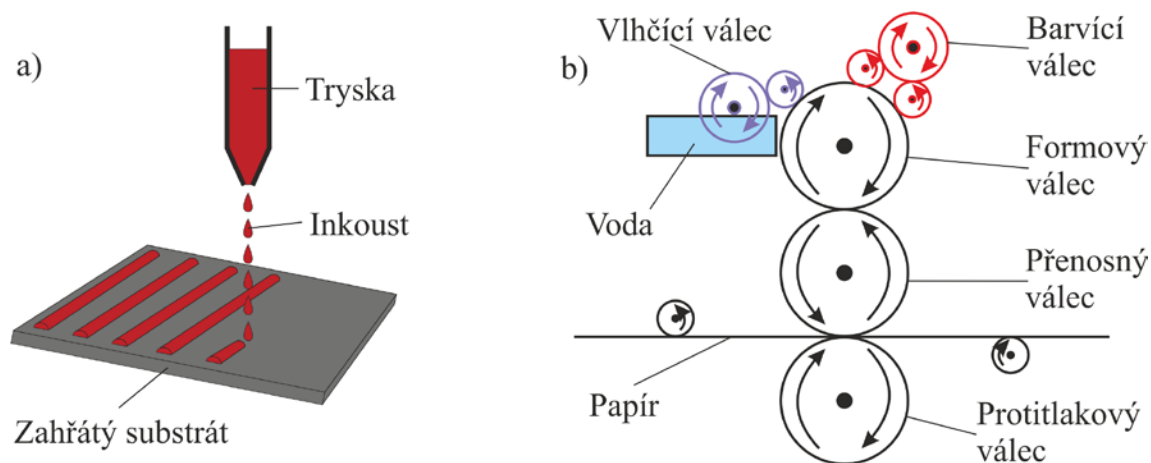
Obr. 22 Schéma nanášení pomocí kapek: a) nanášení roztoku, b) vypařování rozpouštědla, c) vzniklý reliéf

### 2.7.3 Materiálový tisk (material printing)

Materiálový tisk neboli „material printing“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu vstřikování kapek roztoku (inkoustu) z tiskových trysek. Konvenční inkoustový tisk nemusí být vždy schopen vytisknout veškerý požadovaný materiál. Například kovy bývají nanášeny pomocí koloidních inkoustů, ale ty jsou drahé a často ucpávají trysky tiskárny. [17, 46]

Řešením je reaktivní inkoustový tisk, který využívá inkoust na bázi směsi prekurzoru tištěné látky a reakčního činidla, která je připravena těsně před tiskem (*Obr. 23*). Tištěná látka vzniká až na substrátu a to chemickou reakcí. Uvedený druh tisku je vhodný pro tisk měděných kontaktů. [17, 46]

Ofsetový tisk neboli „offset printing“ funguje na principu separace na rozhraní. Ofsetový tisk se skládá z několika kroků a to: nanesení vrstvy inkoustu na rovnou plochu, přenos inkoustu na roli, přejetí role po vzoru a přejetí role s negativem vzoru po substrátu, který je určen na potisk (*Obr. 23*). U tohoto typu tisku lze použít i inkoust se stříbrnými nanočásticemi. Nevýhodou této metody nanášení je, že se nedá použít pro tisk vrstev, které jsou tenčí než 1 nm. [17]

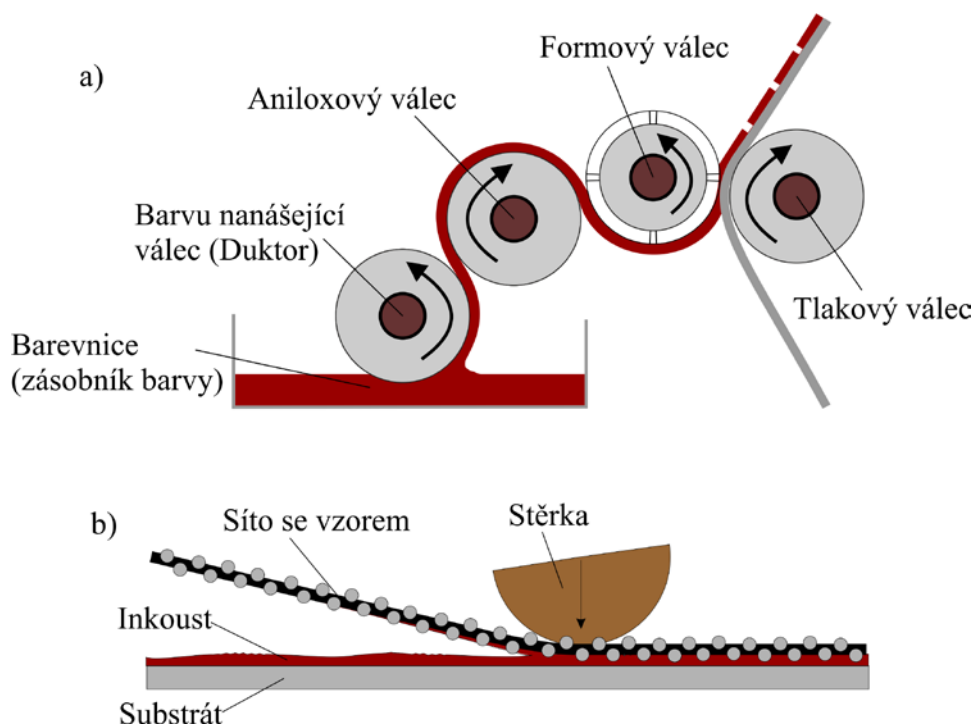


*Obr. 23 Schéma nanášení: a) reaktivního inkoustového tisku, b) ofsetového tisku*

Mezi další metody patří flexotisk neboli „flexo printing“, který funguje na principu nanášení inkoustu na rotující válec, který je pokrytý tiskovým vzorem (*Obr. 24*). A poté tisk tohoto vzoru, namočeného do inkoustu, na daný substrát. [17]

Další metodou je sítotisk neboli „screen printing“, který funguje na principu natlačení inkoustu na síto s určitým vzorem pomocí stěrky a poté odstranění síta z tištěného povrchu (*Obr. 24*). Popisovanou metodu lze použít při výrobě barevných filtrů k LCD displejům. Sítotiskem lze vytvořit vrstva cca 2 až 3  $\mu\text{m}$  vysoká, tedy nijak nezaostává za inkoustovým tiskem (rychlost, náklady i praktičnost jsou srovnatelné). [17]

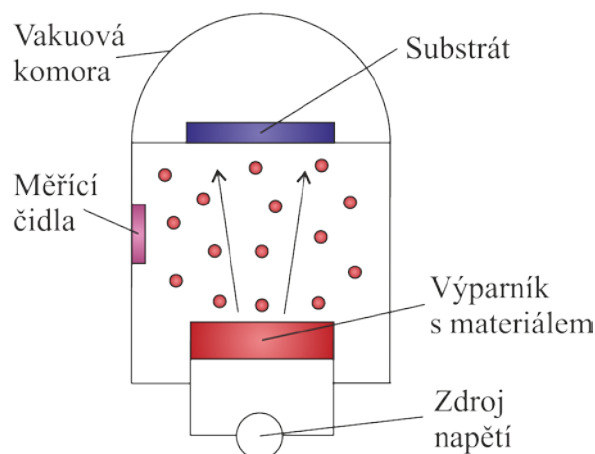




Obr. 24 Schéma nanášení: a) flexotisku, b) sítotisku

#### 2.7.4 Tepelné napařování (thermal evaporation)

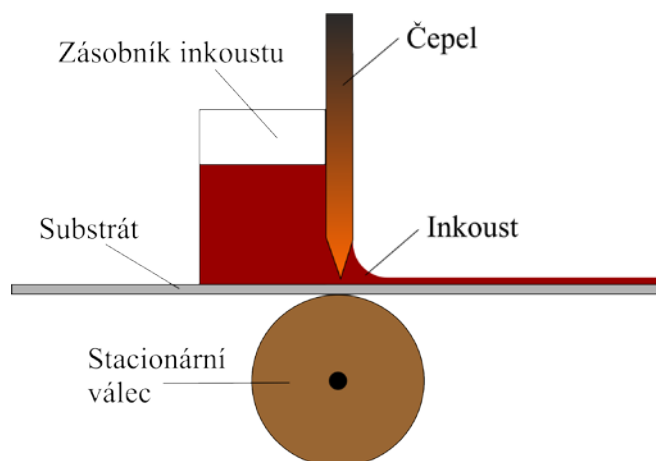
Tepelné napařování neboli „thermal evaporation“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu vypařování látky za zvýšené teploty a poté kondenzace látky za nižší teploty (Obr. 25). V praxi se využívají stínící masky a snížený tlak (vakuum). Tepelné napařování se využívá k připevnění hliníkových kontaktů ke vzorkům organických polovodičů. Na kvalitu napařeného kontaktu má značný vliv použitá teplota, z toho důvodu, že se zvyšující se teplotou napařování se zvyšuje účinnost článku a zlepšuje se struktura fotoaktivní vrstvy a nedochází k přílišné difuzi hliníku do vrstvy. Následně v ní nevzniká tolik elektronových pastí a dochází i k lepšímu navázání hliníku na fotoaktivní vrstvu. Nevýhodou této metody je vysoké plýtvání materiálu, drahé vybavení a malá plocha pro nanesení vrstvy. [17, 45]



Obr. 25 Schéma vakuového tepelného napařování

### 2.7.5 Čepelové nanášení (doctor blade coating)

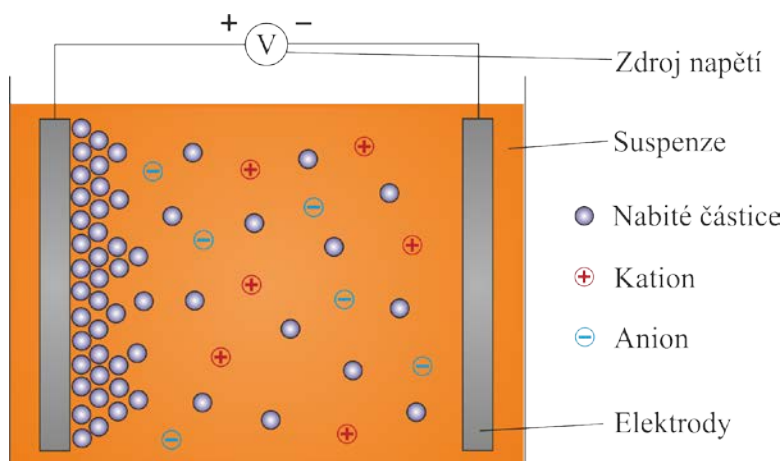
Čepelové nanášení neboli „doctor blade coating“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu pohybujících se nožů přes stacionární substrát nebo naopak (Obr. 26). Používá se velmi dobře smíchané směsi, která obsahuje částice keramiky a další aditiva (např. plastifikátory). Směs se nanese na substrát před čepelí a poté konstantní rychlostí je směs rozprostřena po celé šířce substrátu. Vytvořená vrstva se poté nechá uschnout a vytváří gelovitou tenkou vrstvu. Pomocí této metody je možné vytvořit tenkou vrstvu vysokou 20  $\mu\text{m}$ . Je to nejrozšířenější technika pro tvorbu velkých ploch tenkých vrstev (až několik desítek metrů). [45, 47]



Obr. 26 Schéma čepelového nanášení

### 2.7.6 Elektroforetické nanášení (electrophoretic deposition)

Elektroforetické nanášení neboli „electrophoretic deposition“ je metoda pro přípravu tenkých vrstev, která funguje na principu vložení elektrického pole do suspenze (Obr. 27). Zmíněná metoda se skládá ze dvou kroků. Nejdříve se do suspenze vloží elektrické pole, což má za následek, že nabité částice v suspenzi se pohybují k jedné elektrodě a následně jsou částice sbírány na elektrodě a zároveň se na ni koherentně deponují a vytváří na ní nános vrstvy. Výhodou této metody je, že tenké vrstvy se v tomto případě přizpůsobují tvaru materiálu, takže nemusí být rovné a je možné jí nanášet různé druhy materiálů. Výška takto vytvořené tenké vrstvy je několik  $\mu\text{m}$ . [48]



Obr. 27 Schéma elektroforetického nanášení

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Příprava vzorků

Příprava vzorků se skládala z několika různých kroků. Hlavními kroky byla příprava substrátu, nanesení několika vrstev (např. materiálovým tiskem), napaření katody a zapouzdření celého článku. Celá příprava vzorků fotovoltaických článků je uvedena v následujících kapitolách (viz kapitoly 3.1.1, 3.1.2 a 3.1.3).

#### 3.1.1 Předtisková příprava

K přípravě vzorků fotovoltaických článků byly využity substráty (sklo a keramika), na které byla buď předem natištěna transparentní ITO vrstva (anoda) nebo zlatý kontakt (anoda) od firmy Ossila. Protože ITO vrstva se nacházela po celé ploše substrátu, což bylo nevhodné pro měření, bylo nutné některé části této vrstvy odstranit odleptáním pomocí roztoku HCl s destilovanou vodou (v poměru 1:1) s malým množstvím přidaného práškového zinku. V případě skleněného substrátu se ITO vrstva odleptávala pouze částečně. Na keramickém substrátu byl přichystán napařený zlatý kontakt. Všechny substráty byly před tiskem vrstev pečlivě očištěny nejprve v roztoku tenzidu Neodischer, poté v Mili-Q vodě, následně v acetonu a nakonec v chloroformu.

#### 3.1.2 Tisk vrstev

Na skleněný substrát pokrytý ITO vrstvou byla nejprve nanесena vrstva PEDOT:PSS (od firmy COC Rybitví) a poté aktivní vrstva PdPc popř. PdPc + IL. Na keramický substrát pokrytý zlatým kontaktem byla nejprve nanесena aktivní vrstva PdPc popř. PdPc + IL a poté PMMA. Jednotlivé podmínky přípravy daných vzorků jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 1*). Použité materiály odebíráme od firmy Ossila, COC Rybitví a Sigma Aldrich.

Vrstva PEDOT:PSS byla nanášena ve dvou vrstvách pomocí statického „spin-coatingu“ při použití 70  $\mu$ l a otáčkách 2 000 rpm a teplotě 100 °C. Vrstva PMMA obsahovala 5% PMMA (bylo rozpuštěno 7,5 mg PMMA na 0,5 ml  $\text{CHCl}_3$ ), dvě vrstvy byly také nanесeny pomocí statického „spin-coatingu“ a bylo použito 70  $\mu$ l při otáčkách 2 000 rpm.

K tisku aktivních vrstev se využila tiskárna Fujifilm Dimatix, která pracuje na principu materiálového tisku (viz kapitola 2.7.3). Tiskové podmínky pro vrstvu PdPc byl nátisk jedné vrstvy šestnácti tryskami při rozteči 20  $\mu$ m pod úhlem 4,5° s teplotou substrátu 60 °C. Tiskové podmínky pro vrstvu PdPc + IL (10 % hm. IL) byl nátisk jedné vrstvy pěti tryskami při rozteči 20  $\mu$ m pod úhlem 4,5° s teplotou substrátu 30 °C.

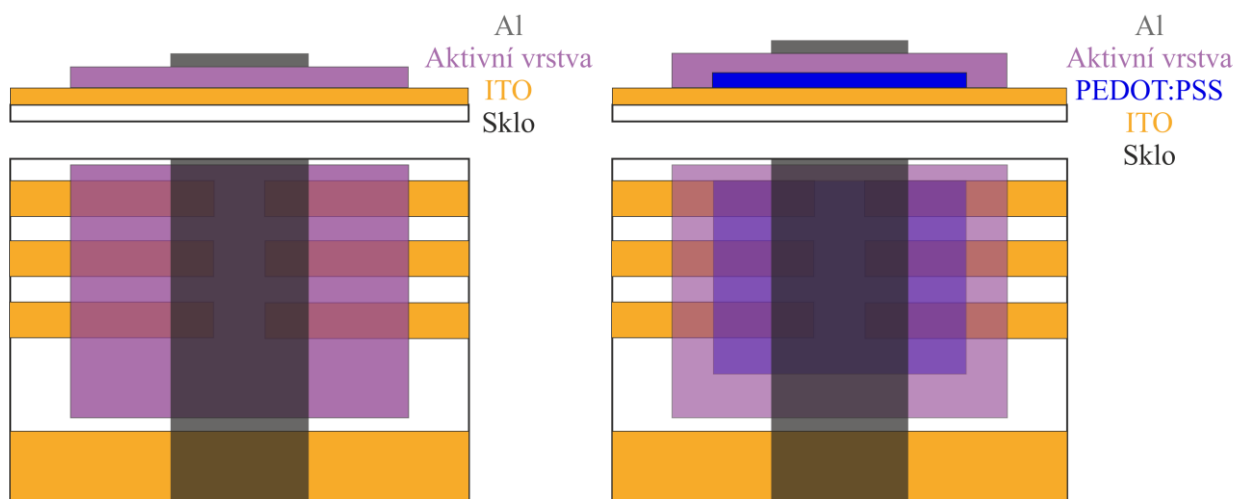
*Tabulka 1 Podmínky přípravy a struktura jednotlivých vzorků*

Poř. číslo	Podložka	Spodní elektr.	PEDOT: PSS	Aktivní vrstva	Tiskové podmínky	PMMA	Horní elektr.	Laminace
1	Sklo	ITO	–	4,5 mg PdPc (1,5 ml CHN)	16 trysek 20 $\mu$ m 1 vrstva	–	Al	Epoxy + sklo
2A	Sklo	ITO	PEDOT: PSS	4,5 mg PdPc (1,5 ml CHN)	16 trysek 20 $\mu$ m 1 vrstva	–	Al	Epoxy + sklo

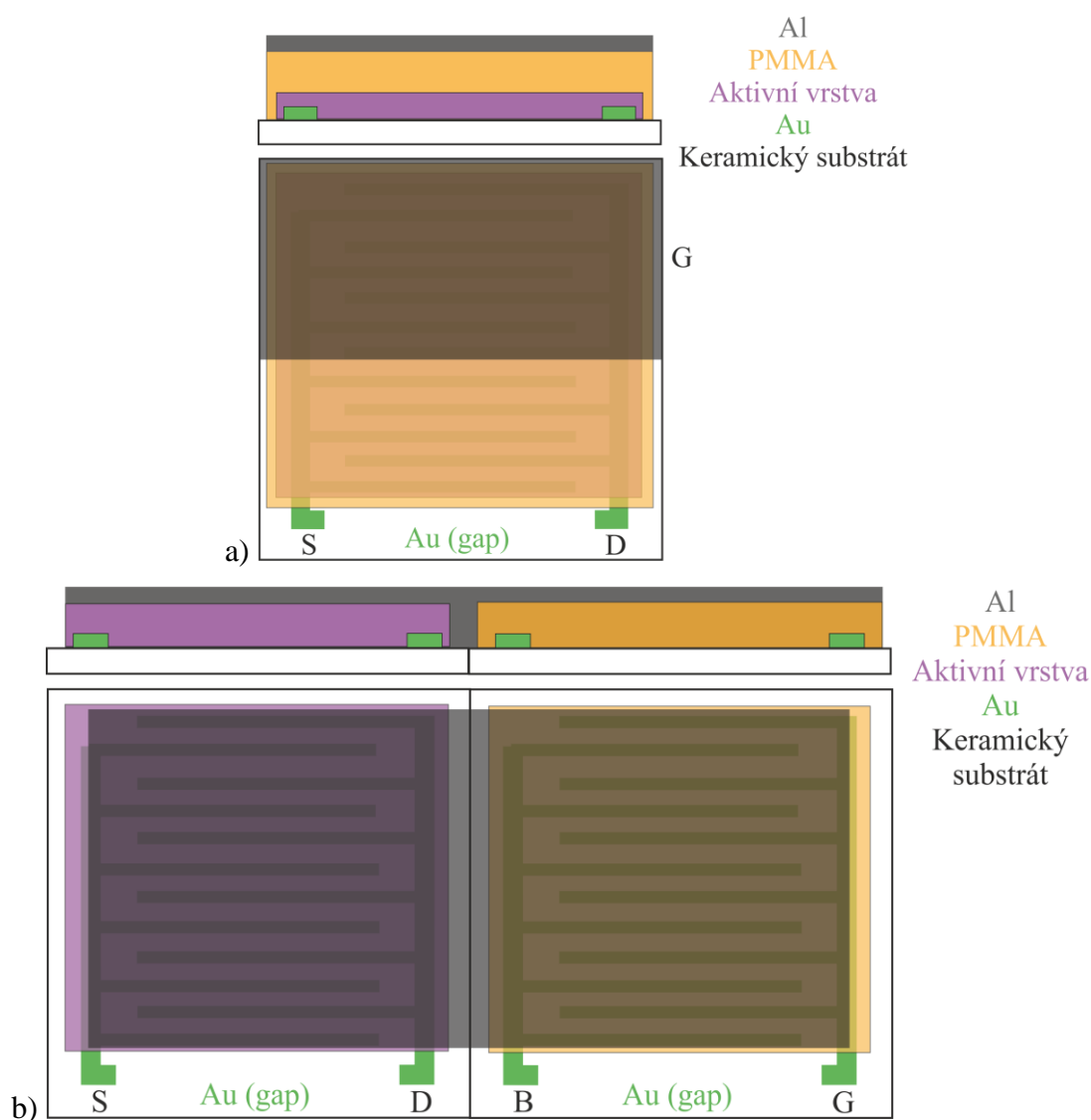
<b>2B</b>	Sklo	ITO	PEDOT: PSS	4,5 mg PdPc (1,5 ml CHN)	16 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	–	Al	Epoxy + sklo
<b>3</b>	Sklo	ITO	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	5 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	–	Al	Epoxy + sklo
<b>4</b>	Sklo	ITO	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	5 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	–	Al	Epoxy + sklo
<b>5A</b>	Kera- mika	Au	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	5 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo
<b>5B</b>	Kera- mika	Au	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	5 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo
<b>6</b>	Kera- mika	Au	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	3 trysky 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo
<b>7</b>	Kera- mika	Au	–	4,5 mg PdPc (1,5 ml CHN)	5 trysek 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo
<b>8</b>	Kera- mika	Au	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	3 trysky 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo
<b>9</b>	Kera- mika	Au	–	6 mg PdPc + IL (2 ml CHN)	3 trysky 20 $\mu\text{m}$ 1 vrstva	5% PMMA (0,5 ml $\text{CHCl}_3$ )	Al	Epoxy + sklo

### 3.1.3 Potisková příprava

Po nanesení vrstev byla na článek vakuově napařena horní hliníková katoda. Poté byl foto-voltaický článek zapouzdřen pomocí E131 Encapsulation Epoxy a laminačního skla. Nakonec byl vzorek nakontaktován pomocí kovových kontaktovacích nožek od firmy Ossila a tímto byl vzorek připraven pro následné proměřování. Vzorek se skleněným substrátem byl opatřen šesti kontakty, zatímco vzorek s keramickým substrátem obsahoval pouze jeden kontakt. Struktura vzorků se skleněným (*Obr. 28*) a keramickým (*Obr. 29*) substrátem je uvedena na obrázcích níže.



Obr. 28 Struktura vzorků fotovoltaického článku se skleněným substrátem (sendvič), vlevo bez použití vrstvy PEDOT:PSS (vzorky 1, 3, 4), vpravo s využitím vrstvy PEDOT:PSS (vzorky 2A, 2B)



Obr. 29 Struktura vzorků fotovoltaického článku OFET s keramickým substrátem (gap): a) jednoduchá struktura (vzorky 7, 8, 9), b) dvojitá struktura (vzorky 5A, 5B, 6)

## 3.2 Studium geometrických a optických vlastností

Při studiu geometrických a optických vlastností byl proměřován samotný povrch a struktura vzorku fotovoltaiického článku. Různými metodami se přitom zkoumají případné nerovnosti a deformace na povrchu, samotná výška jednotlivých tenkých vrstev nebo také optické parametry článku.

### 3.2.1 Optická mikroskopie

Optická mikroskopie umožňuje zkoumat struktury vzorků až do 1 000 násobného zvětšení a to bez speciálních úprav použitého mikroskopu, při broušení nebo leštění substrátu. Při pozorování neleštěného povrchu je využito jen malých zvětšení. Pro větší zvětšení těchto povrchů se používá konfokální mikroskop, který má vyšší hloubky ostroty.

Pro sledování struktury vzorků byl použit mikroskop Nikon Eclipse TE200 (*Obr. 30*) se čtyřnásobným zvětšením a osvětlením shora. Pro zaznamenání mikrofotografie sledovaného obrazu vzorku byl využit digitální fotoaparát Nikon D5000 (*Obr. 30*) a program Camera Control Pro.



*Obr. 30 Vlevo mikroskop Nikon Eclipse TE200, vpravo digitální fotoaparát Nikon D5000 [17]*

V práci je prezentován výsledek optické mikroskopie, ukazující vlastnosti povrchů nanesených vrstev.

### 3.2.2 Profilometrie

Profilometrie umožňuje měřit tloušťku nanesených vrstev na vzorek fotovoltaiického článku. Profilometr snímá hrotem tvar a nerovnosti celého povrchu vzorku v řádech nanometrů.

### 3.2.3 Elipsometrie

Elipsometrie je využívána pro zkoumání povrchů. Elipsometrie umožňuje nalézt optické parametry jednovrstevnatých i vícevrstevnatých struktur vzorků. Funguje na principu snímání fázové změny elektromagnetického vlnění, které se odráží od zkoumaného povrchu vzorku.

### 3.3 Měření stejnosměrných (volt-ampérových) charakteristik

Měření stejnosměrných neboli volt-ampérových charakteristik (VA) za světla bylo zkoumáno pod simulátorem slunečního záření LOT-ORIEL LS0916 (Obr. 31), který obsahoval xenonovou výbojku, při osvětlení  $1\,000\text{ W/m}^2$ .



Obr. 31 Simulátor slunečního záření LOT-ORIEL LS0916 [17]

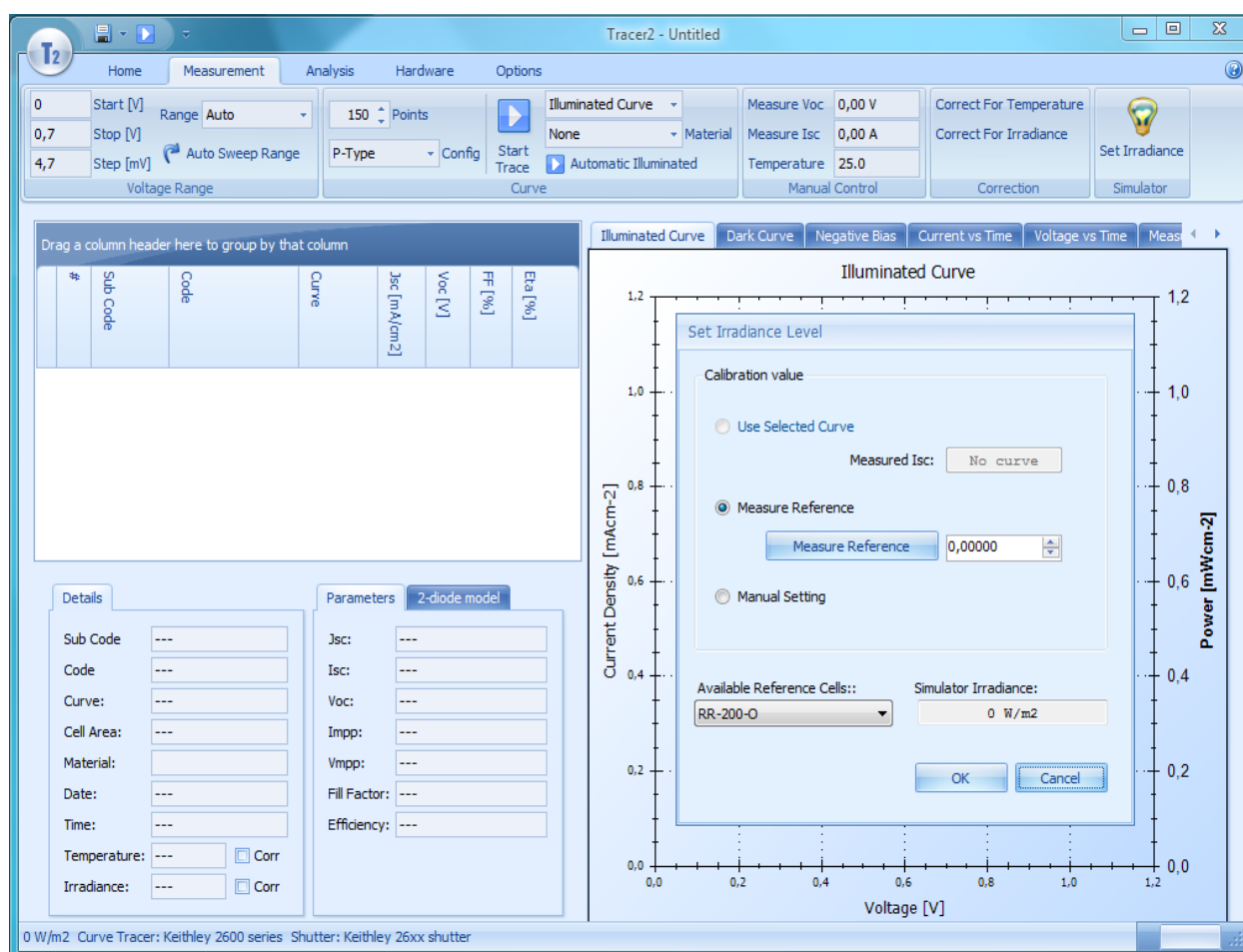
K měření VA charakteristik byl použit elektrometr Keithley 6517B (Obr. 32) s využitím programu „Tracer2“ (Obr. 33). VA charakteristiky vzorků byly proměřovány vzestupně a sestupně, vždy série za světla a za tmy. Rozsah vzestupného měření byl od  $-5\text{ V}$  až  $5\text{ V}$  eventuálně  $-1\text{ V}$  až  $1\text{ V}$  a rozsah sestupného měření od  $5\text{ V}$  až  $-5\text{ V}$  eventuálně  $1\text{ V}$  až  $-1\text{ V}$ . Pro vzestupné i sestupné měření bylo vždy využito 400 kroků v daném rozsahu hodnot.



Obr. 32 Elektrometr Keithley 6517B [17]

V programu „Tracer2“ v ovládacím panelu (Obr. 33) bylo na kartě „Measurement“ do „Start [V]“ zadáno startovací napětí a do „Stop [V]“ konečné napětí a do „Points“ počet kroků měření. V „Set Irradiance“ bylo vybráním „Manual Setting“ a zapsáním hodnoty 989 do „Simulator Irradiance“ nastaveno osvětlení  $1\,000\text{ W/m}^2$  (pro měření za světla). V „Range“ bylo možné zapsat maximální měřený proud. Měření bylo poté spuštěno pomocí tlačítka „Start Trace“. Naměřená data byla následně uložena tlačítkem „Export Selected Curves“, které se nachází v kontextovém menu ve zvolených souborech dat. Při uložení dat byla poté zvolena možnost „Curves without parameters“. Výsledné hodnoty byly nakonec zpracovávány v Microsoft Excelu.





Obr. 33 Program Tracer2

### 3.4 Měření střídavých (impedančních) charakteristik

Měření střídavých neboli impedančních charakteristik (IS) za světla bylo také zkoumáno pod simulátorem slunečního záření LOT-ORIEL LS0916 (Obr. 31), který obsahoval xenonovou výbojku, při osvětlení  $1\,000\text{ W/m}^2$ .

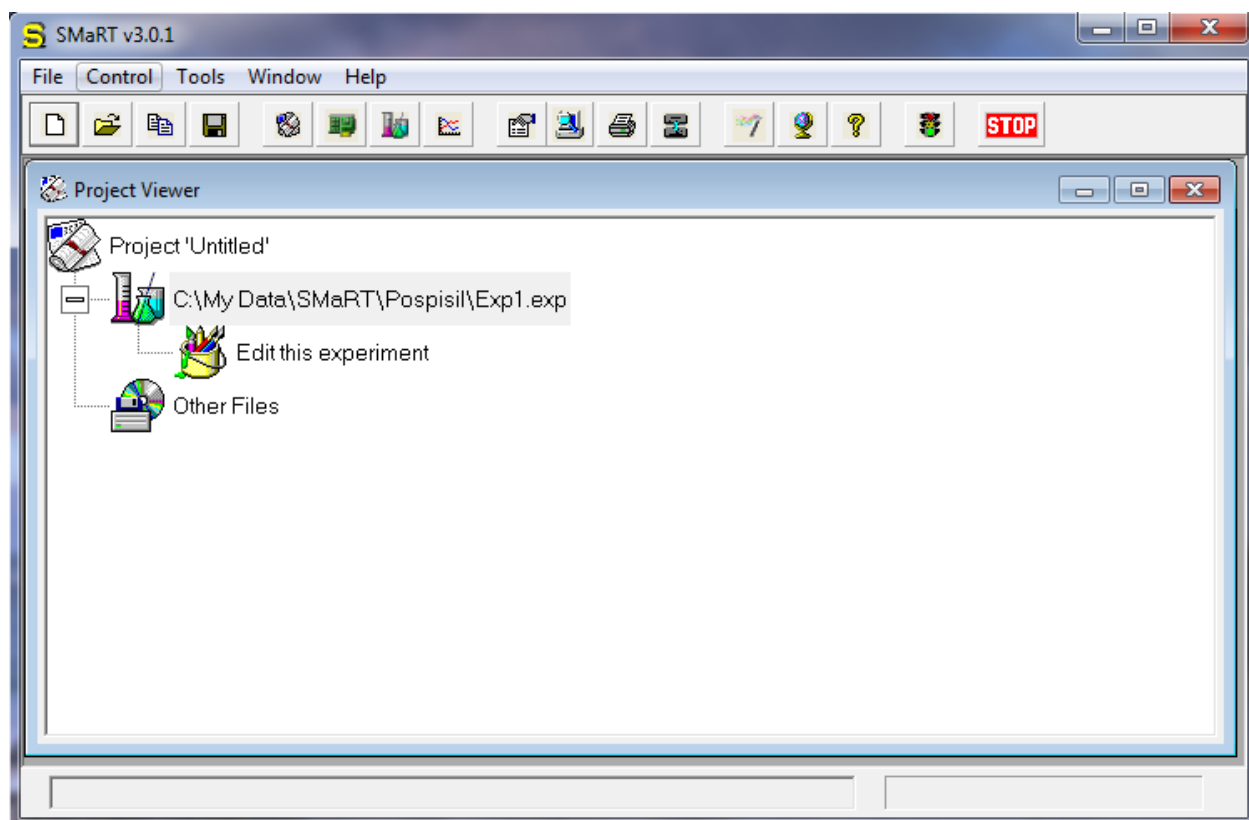
K měření impedančních spekter byl používán impedanční analyzátor Solartron SI 1 260 (Obr. 34) s pomocným modulem Solartron SI 1 296 Dielectric Interface (Obr. 34) a programem „SMART v3.0.1“ (Obr. 35). Vzorky fotovoltaických článků byly proměřovány za světla a za tmy. Rozsah měřené počáteční a koncové frekvence byl zvolen od 20 MHz do 0,05 Hz. Počet měření na dekádu frekvence byl 10, amplituda střídavého napětí 10 mV a stejnosměrné předpětí mělo hodnotu 0 V.



Obr. 34 Vlevo impedanční analyzátor Solartron SI 1 260 a vpravo modul Solartron SI 1 296 Dielectric Interface [17]



Pomocí první ikonky zleva byla vytvořena nová dávka (*Obr. 35*) před úplným začátkem měření (byla zvolena dávka, která slouží jako šablona). Poté bylo zvoleno „Edit this experiment“ a „Sweep Frequency“ a tím byla nastavena počáteční a koncová frekvence a počet měření na dekádu frekvence. V „Set AC Level“ bylo zvoleno střídavé napětí a stejnosměrné napětí v „Set DC Level“. Poté bylo měření zahájeno pomocí ikonky semaforu vpravo, byl zvolen experiment a následně byla odmítnuta konfigurace grafu. Po ukončení měření byla naměřená data pomocí možnosti „Convert“ převedena do Microsoft Excelu a následně zpracována.



*Obr. 35 Program SMART*

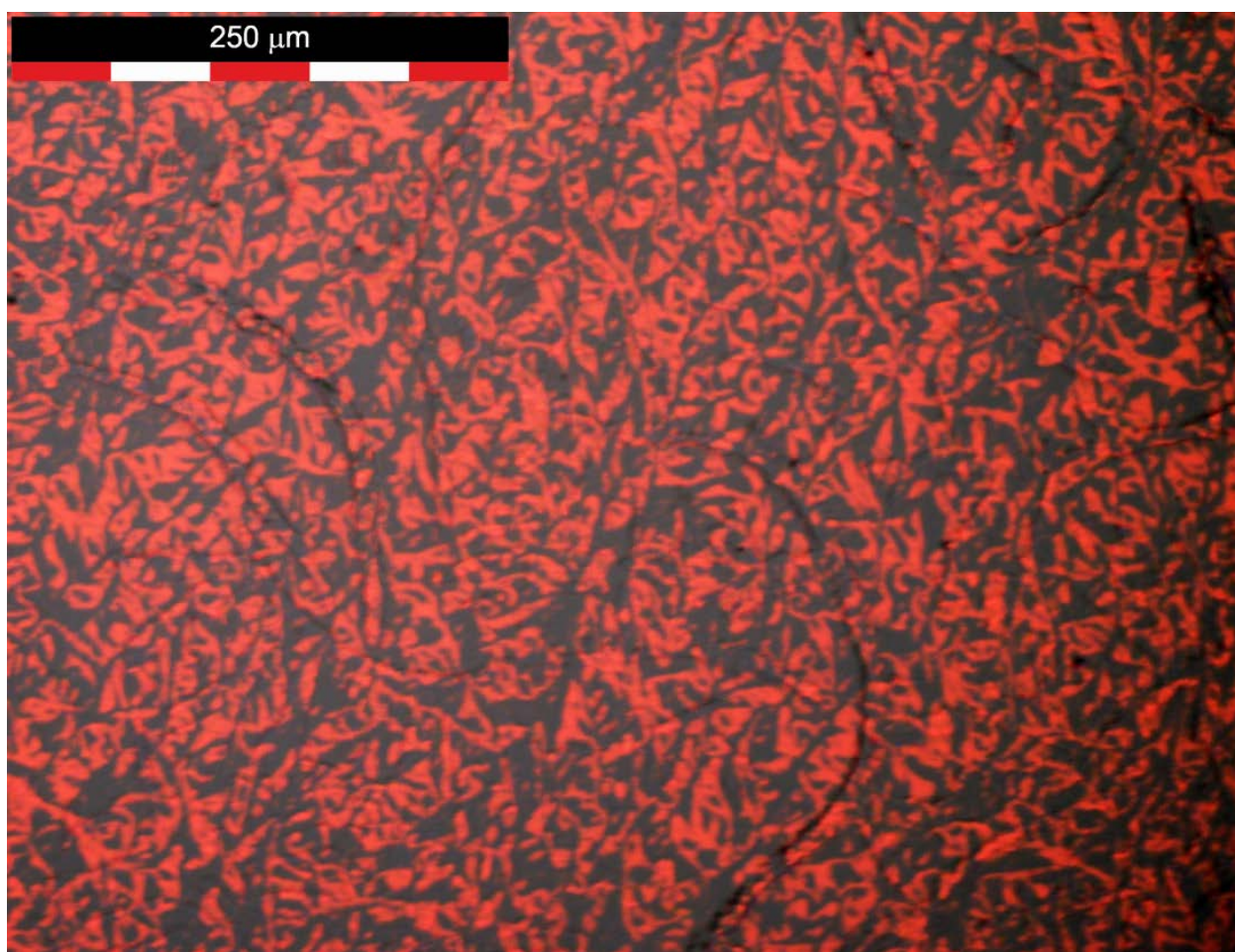
## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Vzorky, vyrobené podle tabulky (*Tabulka 1*) v kapitole 3.1.2 byly následně prozkoumány a popsány z hlediska optických, elektrických a dielektrických vlastností. V následujících kapitolách jsou uvedeny pouze nejpřínosnější výsledky.

### 4.1 Studium geometrických a optických vlastností

#### 4.1.1 Optická mikroskopie

Tenká aktivní vrstva PdPc vykazuje krystalickou strukturu, viz obrázek níže (*Obr. 36*). Krystaly jsou vysoce neuspořádané, mají tmavé okraje a vyplňují celý povrch tenké aktivní vrstvy. Samotná vrstva nevykazuje nečistoty, které by přispěly ke zhoršení měřených vlastností. Uvedená mikrofotografie byla pořízena při dvacetinásobném zvětšení vrstvy.



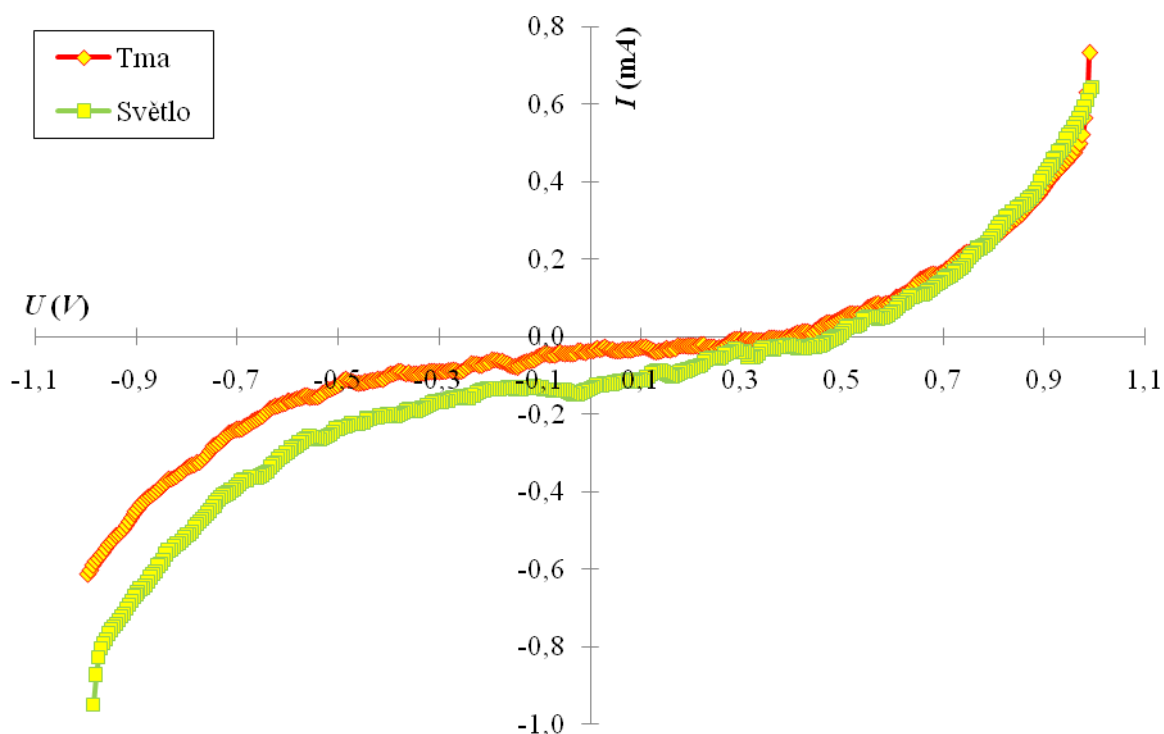
*Obr. 36* Mikrofotografie struktury tenké aktivní vrstvy PdPc

### 4.2 Měření stejnosměrných charakteristik

Při měření stejnosměrných charakteristik připravených fotovoltaiických vzorků, získáváme volt-ampérové závislosti. Výsledné závislosti jsou poté vyneseny do grafů. Měření stejnosměrných charakteristik probíhalo za tmy a za světla, vždy při konstantní teplotě.

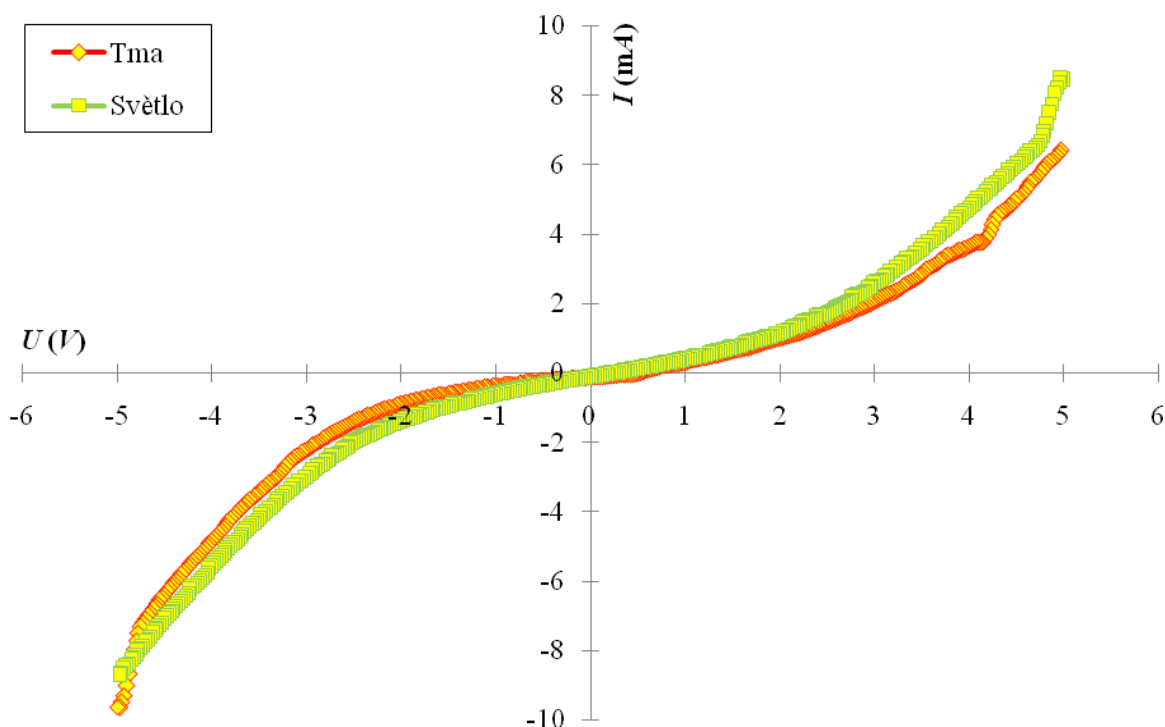
#### 4.2.1 Volt-ampérové charakteristiky sendvičových struktur

Na obrázku (Obr. 37) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 1e (viz *Tabulka 1*) za tmy a při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorek 1e neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS a neobsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Z obrázku je zřejmé, že při měření za tmy a za světla nedochází k významné změně ve volt-ampérové charakteristice. Závislost má nelineární a symetrický charakter. Vzorek vykazuje v záporných a kladných hodnotách napětí fotobariéru (pro napětí je proud při měření za tmy vyšší než při osvětlení). Křivky měřeného vzorku mají minima pro  $0\text{ V}$  pod hodnotou  $0\text{ mA}$ , z čehož vyplývá, že vzorek vykazuje fotovoltaiický jev.



Obr. 37 Volt-ampérová charakteristika vzorku 1e

Na obrázku (Obr. 38) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 2B-a (viz *Tabulka 1*) za tmy a při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorek 2B-a obsahuje vrstvu PEDOT:PSS a neobsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Z obrázku je zřejmé, že při měření za tmy a za světla nedochází k významné změně ve volt-ampérové charakteristice. Závislost má nelineární a symetrický charakter. Vzorek vykazuje v záporných hodnotách napětí fotobariéru (pro záporné napětí je proud při měření za tmy vyšší než při osvětlení). A v kladných hodnotách napětí projevuje fotovodivost (pro kladné napětí je proud při měření za tmy nižší než při osvětlení). Křivky měřeného vzorku mají minima pro  $0\text{ V}$  pro hodnotu  $0\text{ mA}$ , z čehož vyplývá, že vzorek nevykazuje fotovoltaiický jev.

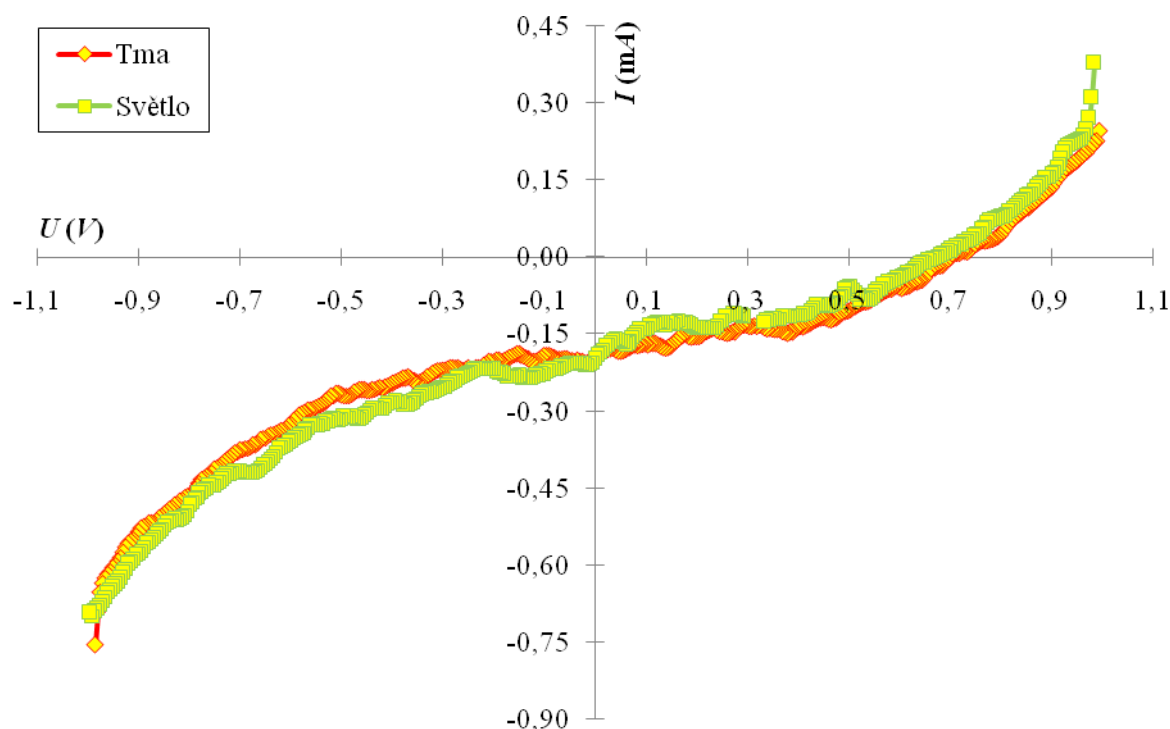


Obr. 38 Volt-ampérová charakteristika vzorku 2B-a

Na obrázku (Obr. 39) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 4c (viz *Tabulka 1*) za tmy a při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorek 4c neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS a obsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Z obrázku je zřejmé, že při měření za tmy a za světla nedochází k významné změně ve volt-ampérové charakteristice. Závislost má nelineární a symetrický charakter.

Vzorek 4c má vysoké zabudované napětí na rozhraní, což je způsobeno přidáním iontové kapaliny k aktivní vrstvě. Vysoké zabudované napětí na rozhraní způsobuje, že křivky neprocházejí nulovým bodem. Při nulovém napětí už prochází proud, díky vlivu iontových kapalin.

Vzorek vykazuje v záporných hodnotách napětí fotobariéru (pro záporné napětí je proud při měření za tmy vyšší než při osvětlení). A v kladných hodnotách napětí projevuje fotovodivost (pro kladné napětí je proud při měření za tmy nižší než při osvětlení). Křivky měřeného vzorku mají minima pro 0 V pod hodnotou 0 mA, z čehož vyplývá, že vzorek vykazuje fotovoltaický jev.



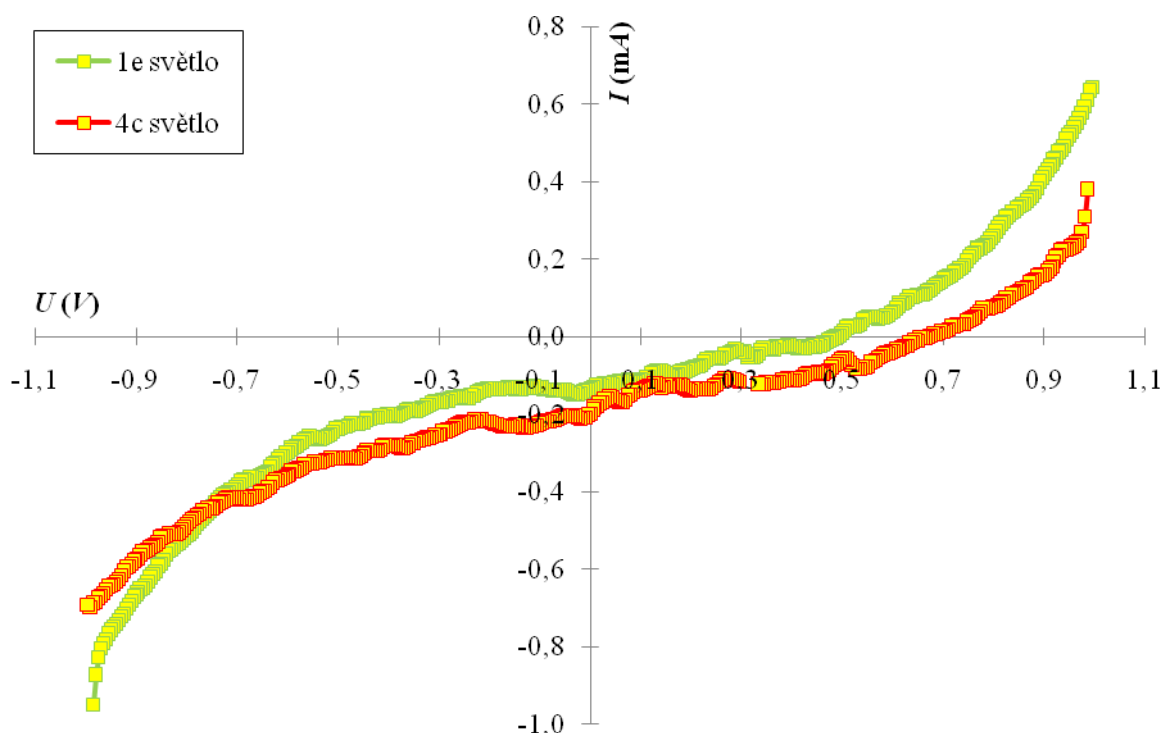
Obr. 39 Volt-ampérová charakteristika vzorku 4c

Na obrázku (Obr. 40) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorků 1e a 4c (viz *Tabulka 1*) při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorek 1e neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS a neobsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě, zatímco vzorek 4c neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS, ale obsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Vzorky se tedy liší v přidavku iontové kapaliny k aktivní vrstvě.

Z obrázku je zřejmé, že vzorek 4c má vyšší zabudované napětí na rozhraní, díky obsahu iontové kapaliny v aktivní vrstvě, než vzorek 1e. Vzorek 1e má strmější chování v propustném směru i v závěrném směru oproti vzorku 4c. Můžeme tedy vyvodit, že vzorek 1e má vyšší výkon, nižší prahové napětí a menší odpor než vzorek 4c.

Vzorek 1e vykazuje v záporných i kladných hodnotách napětí vyšší fotovodivost než pro vzorek 4c. Křivky měřených vzorků mají minima pro 0 V pod hodnotou 0 mA, z čehož vyplývá, že vzorky vykazují fotovoltaiický jev.

Napětí na prázdno vzorku 1e je zde rovno 0,490 V a proud na krátko je roven 0,134 mA. Napětí na prázdno vzorku 4c je zde rovno 0,670 V a proud na krátko je roven 0,199 mA.



Obr. 40 Souhrnná volt-ampérová charakteristika vzorků 1e a 4c

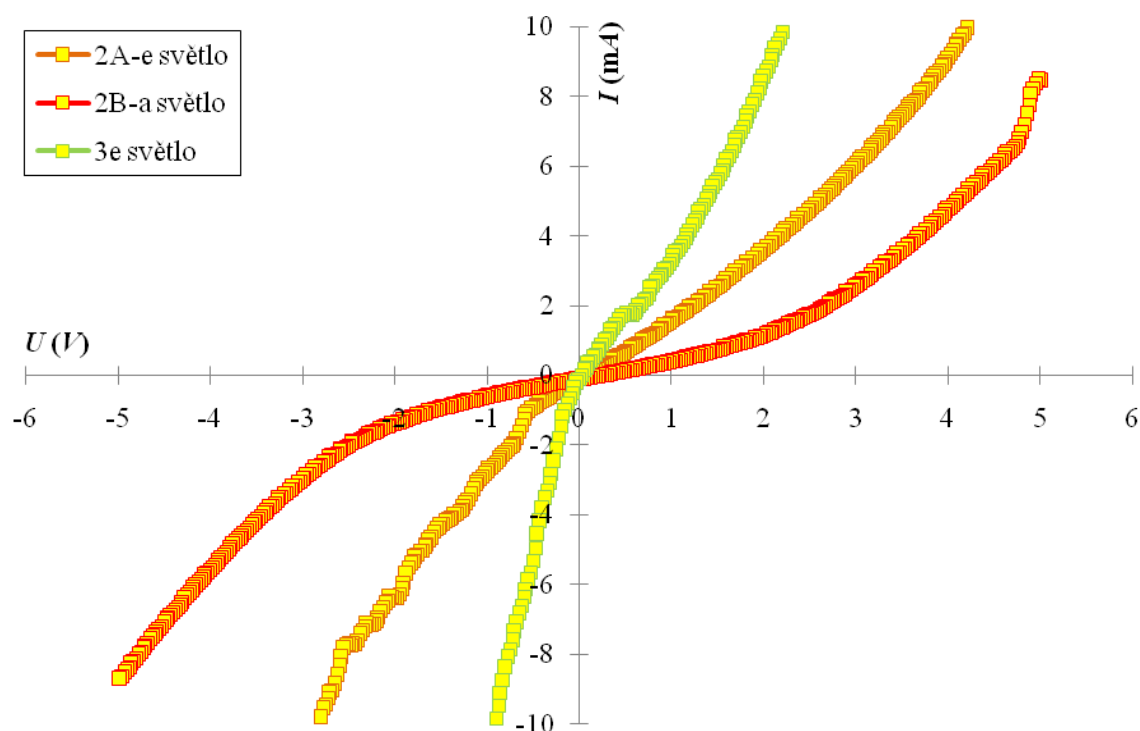
Na obrázku (Obr. 41) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorků 2A-e, 2B-a a 3e (viz Tabulka 1) při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorky 2A-e a 2B-a obsahují vrstvu PEDOT:PSS a neobsahují iontovou kapalinu v aktivní vrstvě, zatímco vzorek 3e neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS, ale obsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Vzorky se tedy liší v přidavku PEDOT:PSS vrstvy a iontové kapaliny k aktivní vrstvě.

Z obrázku je zřejmé, že vzorky mají podobné zabudované napětí na rozhraní. Vzorek 3e má nejstrmější chování v propustném směru i závěrném směru oproti dalším vzorkům. Můžeme říci, že vzorek 3e má nejvyšší výkon, nejnižší prahové napětí a nejmenší odpor než ostatní vzorky. Všechny tři vzorky mají podobné volt-ampérové chování, kde vzorek 3e vykazuje téměř lineární chování, zatímco vzorky 2A-e a 2B-a vykazují nelineární chování. Všechny vzorky mají symetrický tvar křivek.

Vzorky vykazují v záporných i kladných hodnotách napětí fotovodivost. Křivky měřeného vzorku mají minima pro  $0\text{ V}$  pro hodnotu  $0\text{ mA}$ , z čehož vyplývá, že vzorky nevykazují foto-voltaický jev.

Napětí na prázdko vzorku 2A-e je zde rovno  $0,075\text{ V}$  a proud na krátko je roven  $0,000\,124\text{ mA}$ . Napětí na prázdko vzorku 2B-a je zde rovno  $0,275\text{ V}$  a proud na krátko je roven  $0,000\,128\text{ mA}$ . Napětí na prázdko vzorku 3e je zde rovno  $0,003\text{ V}$  a proud na krátko je roven  $0,000\,115\text{ mA}$ .





Obr. 41 Souhrnná volt-ampérová charakteristika vzorků 2A-e, 2B-a a 3e

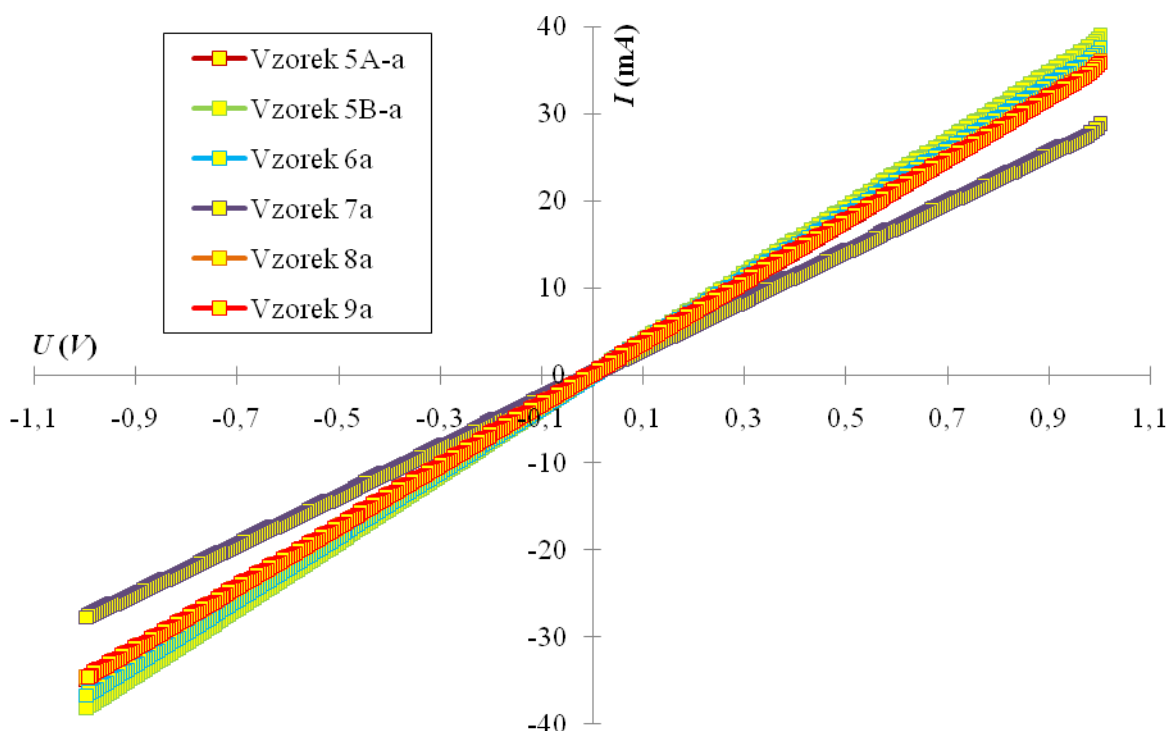
#### 4.2.2 Volt-ampérové charakteristiky gapových struktur

Na obrázku (Obr. 42) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorků 5A-a, 5B-a, 6a, 7a, 8a a 9a (viz *Tabulka 1*) za tmy a při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorky 5A-a, 5B-a, 6a, 8a a 9a obsahují iontovou kapalinu v aktivní vrstvě, zatímco vzorek 7a neobsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Vzorky se tedy liší v obsahu iontové kapaliny k aktivní vrstvě (všechny vzorky obsahují vrstvu PMMA).

Na obrázku jsou uvedeny pouze křivky zaznamenávající průběh měření při osvětlení či za tmy, protože u gapových struktur jsou tyto křivky pro jednotlivé vzorky naprosto totožné. Gapové struktury obsahují ohmické kontakty a nevzniká zde tedy vnitřní napětí mezi elektrodami a danými materiály. Z tohoto poznatku a také z obrázku můžeme konstatovat, že ani jeden ze vzorků 5A-a, 5B-a, 6a, 7a, 8a a 9a není fotovodivý, nemá fotobariéru a ani nevykazuje fotovoltaický jev.

Z obrázku je zřejmé, že vzorky nemají zabudované napětí na rozhraní. Vzorek 7a jako jediný vykazuje odlišný typ chování oproti ostatním vzorkům. Všechny vzorky mají lineární, symetrické křivky volt-ampérových charakteristik. Odlišné chování vzorku 7a je způsobeno tím, že neobsahuje iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Vzorky s iontovou kapalinou vykazují strmější průběh křivek v propustném i závěrném směru.

Napětí na prázdno a proudy na krátko vzorků s gapovou strukturou jsou zde tak malé, že můžeme říci, že jsou pro obě hodnoty rovny 0 (hodnoty napětí na prázdno jsou v řádech desítek tisíc voltů u všech těchto vzorků a hodnoty proudu na krátko jsou v řádech desítek tisíc miliampér u všech těchto vzorků).



Obr. 42 Souhrnná volt-ampérová charakteristika vzorků 5A-a, 5B-a, 6a, 7a, 8a a 9a

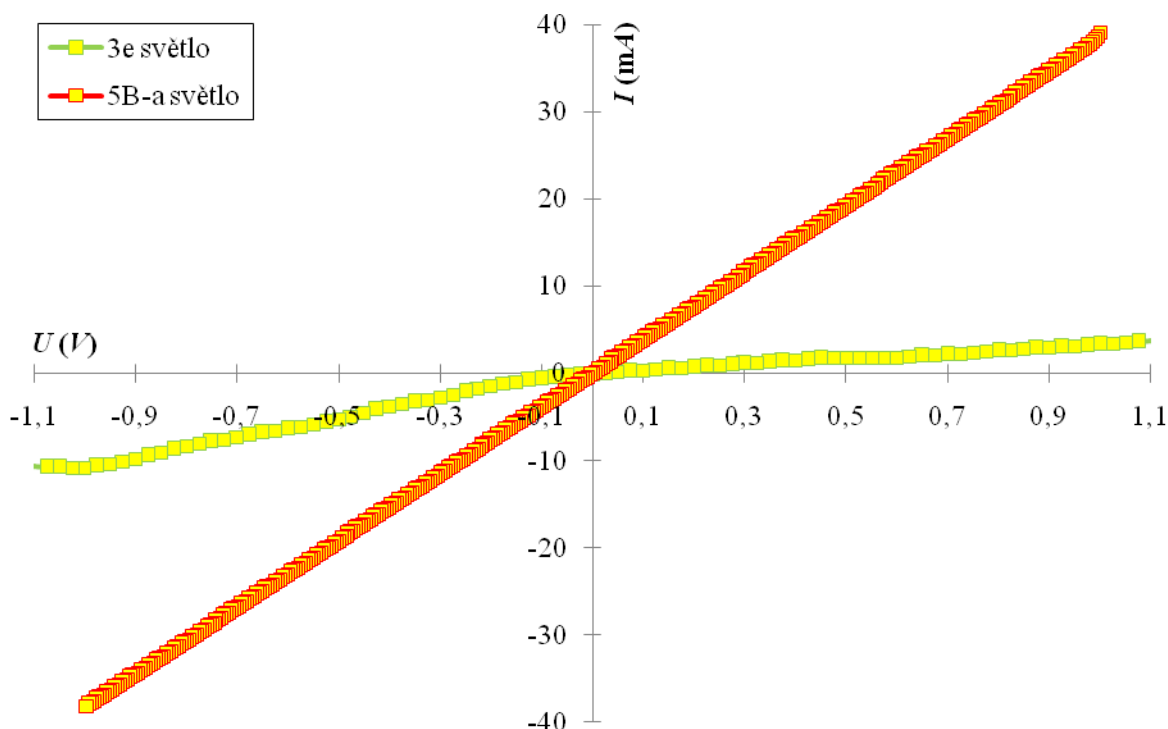
Na obrázku (Obr. 43) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorků 3e a 5B-a (viz *Tabulka 1*) při osvětlení ( $1\,000\text{ W/m}^2$ ). Vzorek 3e obsahuje skleněný substrát a iontovou kapalinu v aktivní vrstvě. Vzorek 5B-a obsahuje keramický substrát, iontovou kapalinu v aktivní vrstvě a vrstvu PMMA. Vzorky se tedy liší v typu substrátu a ve vrstvě PMMA.

Vzorek 3e je vybrán z důvodu nejlepších volt-ampérových charakteristik v oblasti sendvičových struktur. Vzorek 5B-a je vybrán pouze z důvodu nejvyšší vodivosti v oblasti gapových struktur, které ovšem nevykazují fotovodivost ani fotobariéru.

Z obrázku je zřejmé, že vzorky nemají zabudované napětí na rozhraní. Vzorek 5B-a má strmější chování v propustném směru i závěrném směru oproti vzorku 3e. Vzorek 5B-a vykazuje lineární chování, zatímco vzorek 3e má téměř lineární chování. Oba vzorky mají symetrický tvar křivek. Můžeme tedy říci, že vzorek 3e má nejvyšší fotovodivost ze všech měřených vzorků.

Pokud by byl vzorek 5B-a fotovodivý, vykazoval by tedy nejvyšší fotovodivost ze všech naměřených vzorků. Rozdíl ve vodivosti mezi oběma vzorky je značný a to až desetinásobný.





Obr. 43 Volt-ampérová charakteristika vzorků 3e a 5B-a

### 4.3 Měření střídavých charakteristik

Při měření střídavých charakteristik připravených fotovoltaiických článků, získáváme závislosti vodivosti na frekvenci a závislosti fáze na frekvenci. Výsledné závislosti jsou poté vyneseny do grafů. Měření střídavých charakteristik probíhá za tmy, vždy při konstantní teplotě.

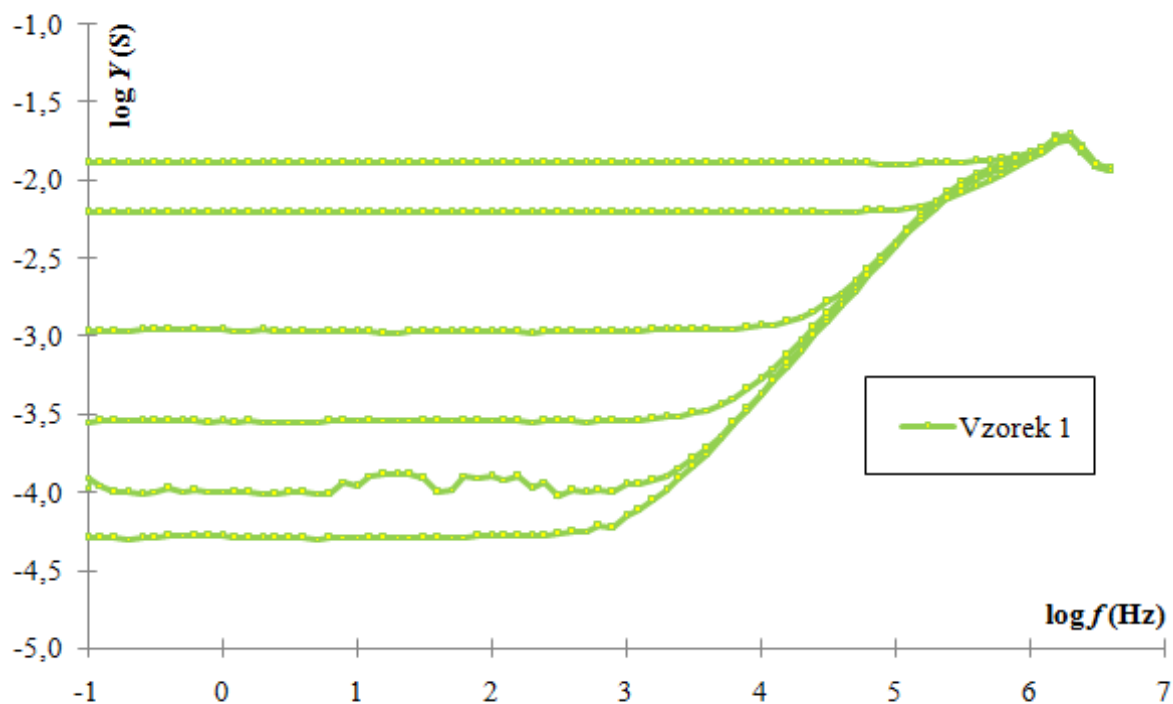
#### 4.3.1 Impedanční spektroskopie sendvičových struktur

Na obrázku (Obr. 44) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku 1 viz tabulka (Tabulka 1) za tmy a na obrázku (Obr. 45) je uvedena závislost fáze na logaritmu frekvence téhož vzorku za tmy. V grafech jsou uvedeny závislosti všech kontaktů daného vzorku (celkem 6).

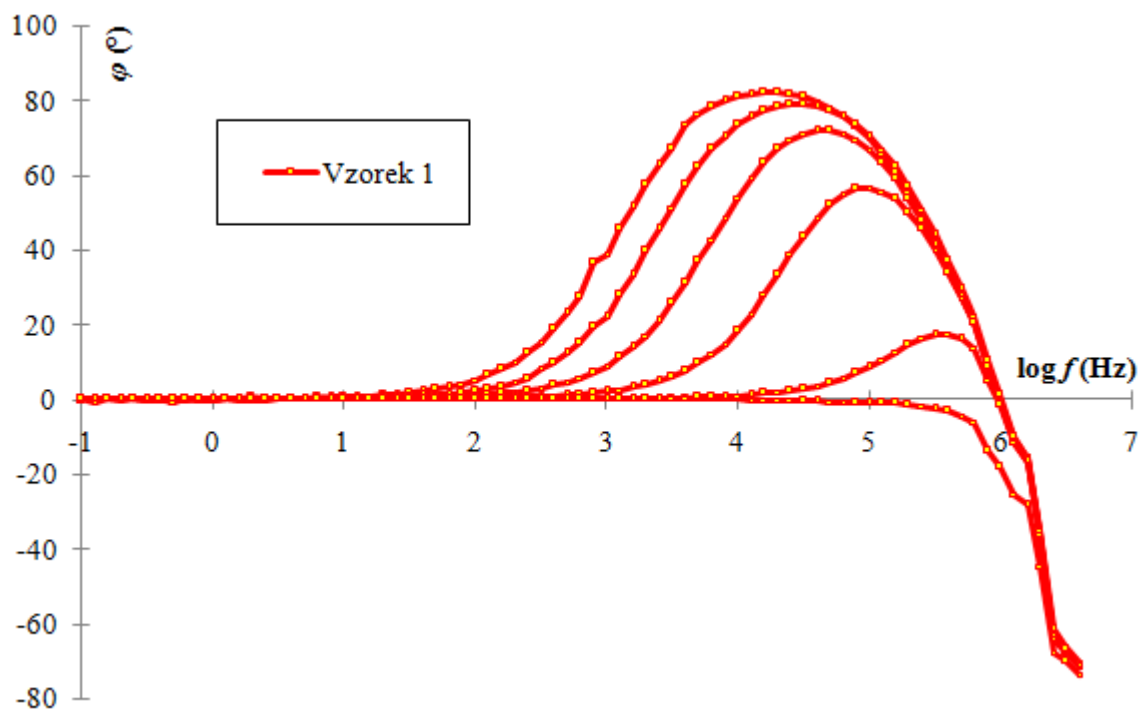
Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 3 Hz resp. 5,8 Hz, poté roste a na konci klesá. U závislosti fáze na logaritmu frekvence vzorku je také chování zprvu konstantní až do hodnoty přibližně 1,6 Hz, poté roste a na konci klesá.

Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro  $0^\circ$  by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro  $90^\circ$  by to byl ideální kondenzátor). Z obrázku je zřejmé, že vzorek má nejprve ohmický charakter a následně přechází do kapacitního charakteru. Na konci křivky je náznak induktivního charakteru.

Při frekvencích vyšších než 6 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).



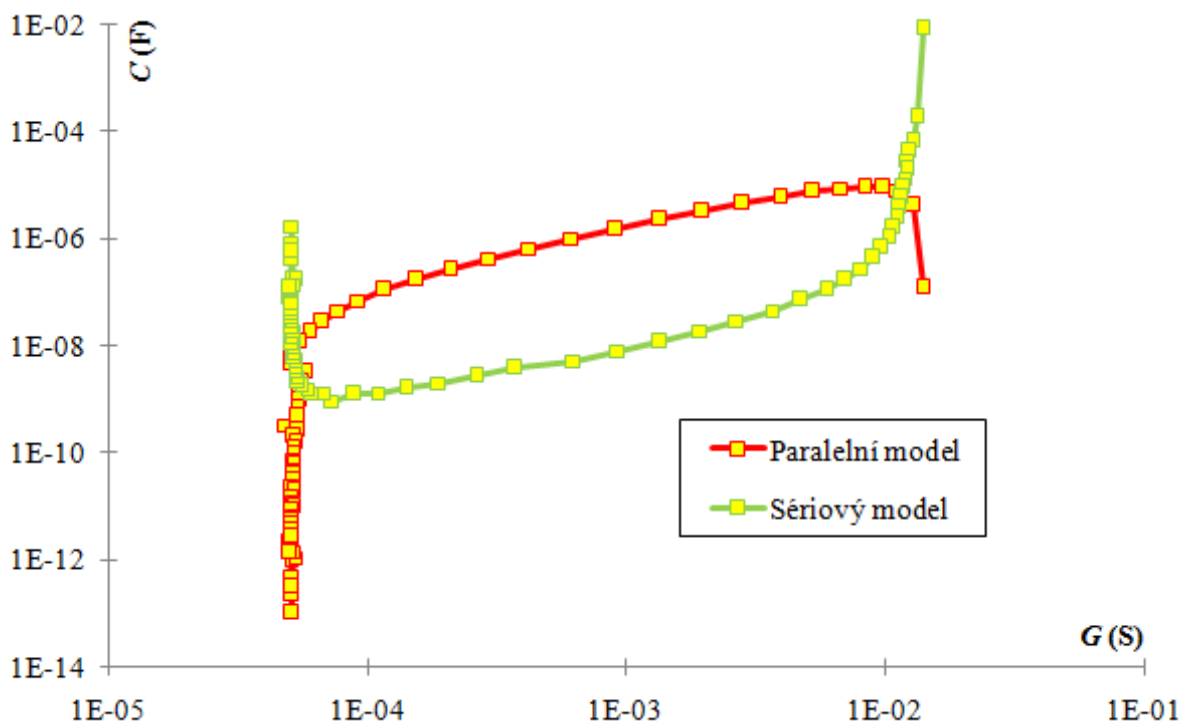
Obr. 44 Závislost vodivosti na frekvenci vzorku 1



Obr. 45 Závislost fáze na frekvenci vzorku 1

Na obrázku (Obr. 46) je uvedena závislost kapacity na vodivosti v logaritmicím měřítku pro paralelní a sériový model vzorku 1, kontaktu b. Jedná se o tzv. „Modifikovaný Cole-Cole diagram“. Ekvivalentní hodnoty při sériovém a paralelním modelu určují geometrické vlastnosti studované struktury. Pokud se tyto hodnoty nemění ( $G_p = G_s = \text{konst}$  resp.  $C_p = C_s = \text{konst}$ ) pak

se jedná o frekvenčně nezávislé parametry. Pokud se tyto hodnoty mění  $C_p = C_s = f(G)$ , pak se jedná o frekvenčně závislé parametry. Závislost paralelní i sériové vodivosti na frekvenci roste (pro nízké frekvence je vodivost  $5 \times 10^{-5}$  S, pro vysoké frekvence je  $4 \times 10^{-3}$  S). Pro vysoké frekvence má závislost induktivní charakter (fáze vodivosti je menší než nula, jedná se o parazitní indukčnosti impedančních analyzátorů). Místo průsečíku sériové a paralelní kapacity ( $2,8 \times 10^{-8}$  F) určuje kapacitní strukturu. Odchyłky v závislosti jsou způsobeny přechodem mezi kapacitním a induktivním charakterem měřené soustavy.



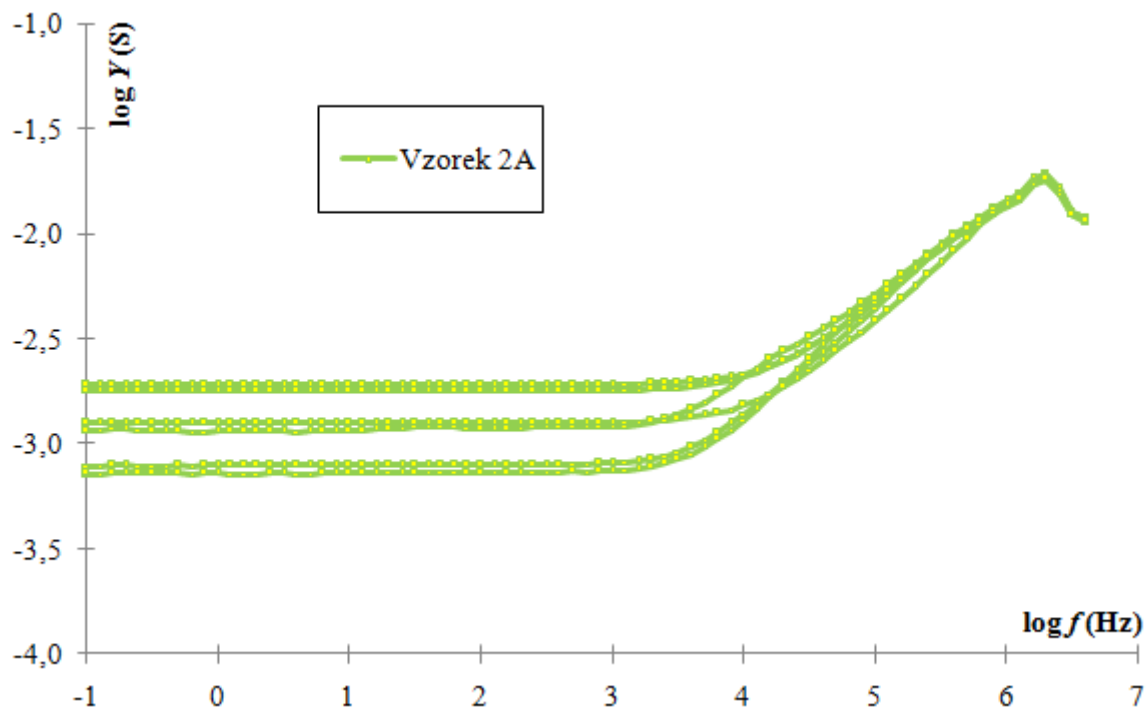
Obr. 46 Závislost kapacity na vodivosti v logaritmickém měřítku pro paralelní a sériový model vzorku 1, kontaktu b

Na obrázku (Obr. 47) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku 2A viz tabulka (Tabulka 1) za tmy a na obrázku (Obr. 48) je uvedena závislost fáze na logaritmu frekvence téhož vzorku za tmy. V grafech jsou uvedeny závislosti všech kontaktů daného vzorku (celkem 6).

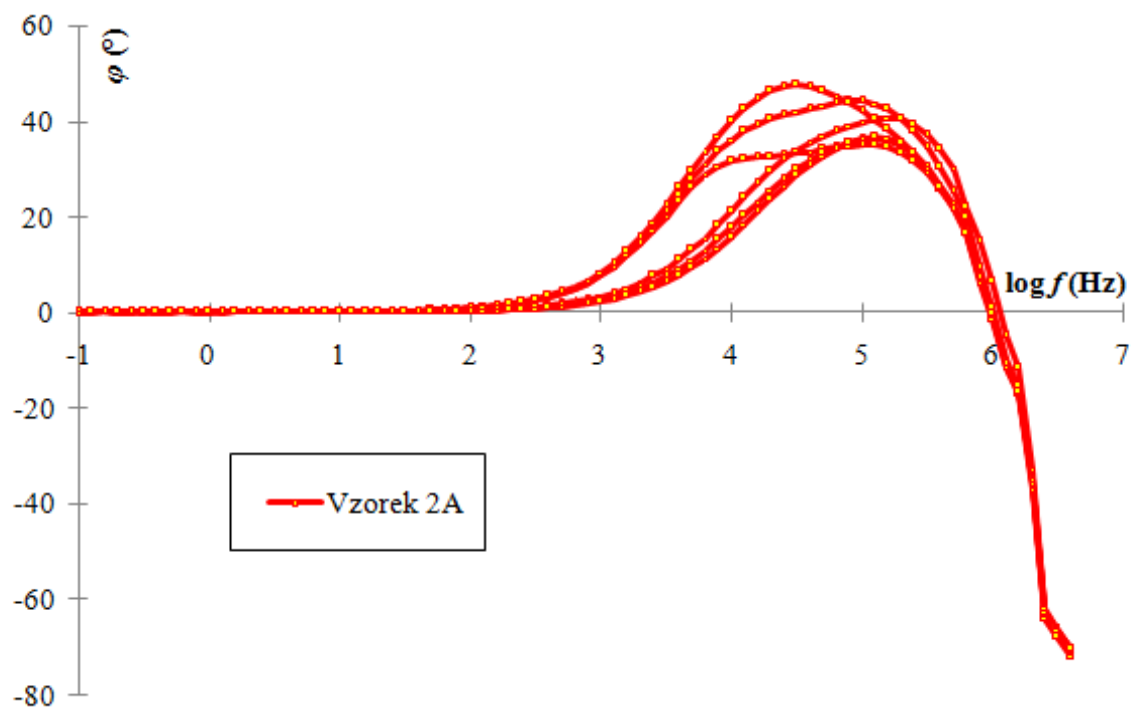
Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 3,4 Hz, poté roste a na konci klesá. U závislosti fáze na logaritmu frekvence vzorku je také chování zprvu konstantní až do hodnoty přibližně 2,5 Hz, poté roste a na konci klesá.

Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro  $0^\circ$  by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro  $90^\circ$  by to byl ideální kondenzátor). Z obrázku je zřejmé, že vzorek má nejprve ohmický charakter a následně přechází do částečného kapacitního charakteru (fáze dosahuje pouze  $48^\circ$ ). Na konci křivky je zde náznak induktivního charakteru.

Při frekvencích vyšších než 6 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).



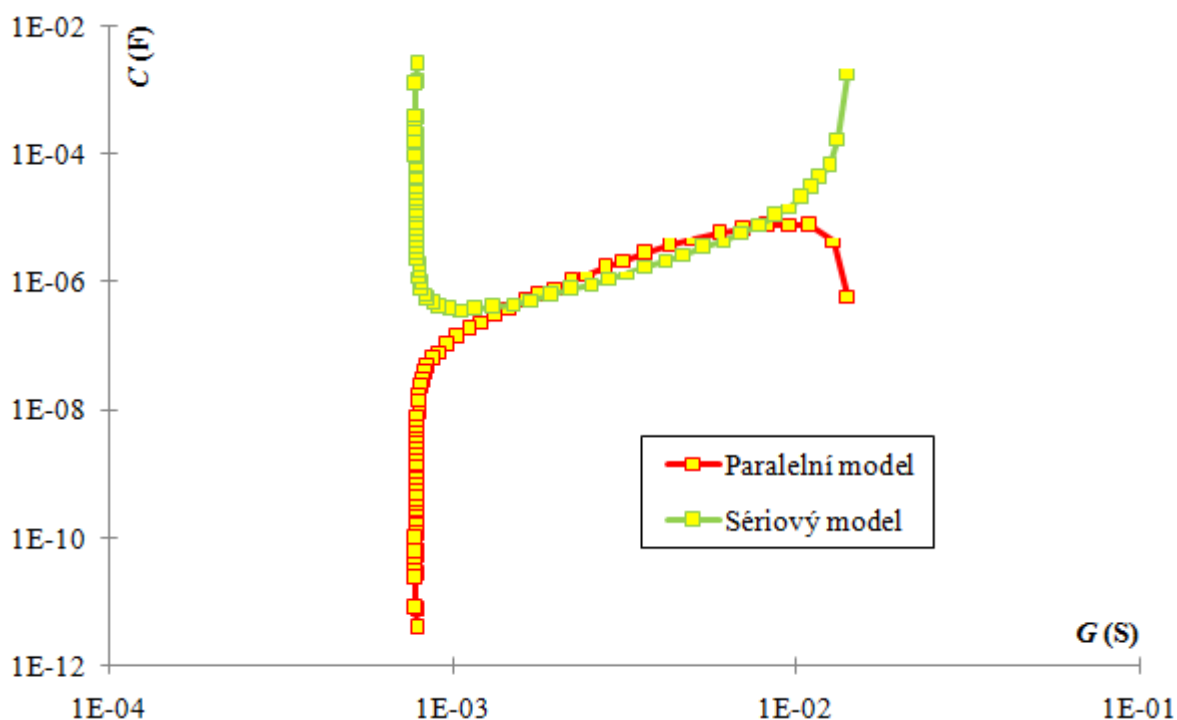
Obr. 47 Závislost vodivosti na frekvenci vzorku 2A



Obr. 48 Závislost fáze na frekvenci vzorku 2A

Na obrázku (Obr. 49) je uvedena závislost kapacity na vodivosti v logaritmickeém měřítku pro paralelní a sériový model vzorku 2A, kontaktu a. Jedná se o tzv. „Modifikovaný Cole-Cole diagram“. Závislost paralelní i sériové vodivosti na frekvenci roste (pro nízké frekvence je vodivost  $7,8 \times 10^{-4}$  S, pro vysoké frekvence je  $3,8 \times 10^{-3}$  S). Pro vysoké frekvence má závislost induktivní

charakter. Místo průsečíku sériové a paralelní kapacity ( $3,5 \times 10^{-6}$  F) určuje kapacitní strukturu. Odchyłky v závislosti jsou způsobeny přechodem mezi kapacitním a induktivním charakterem měřené soustavy.



Obr. 49 Závislost kapacity na vodivosti v logaritmickém měřítku pro paralelní a sériový model vzorku 2A, kontaktu a

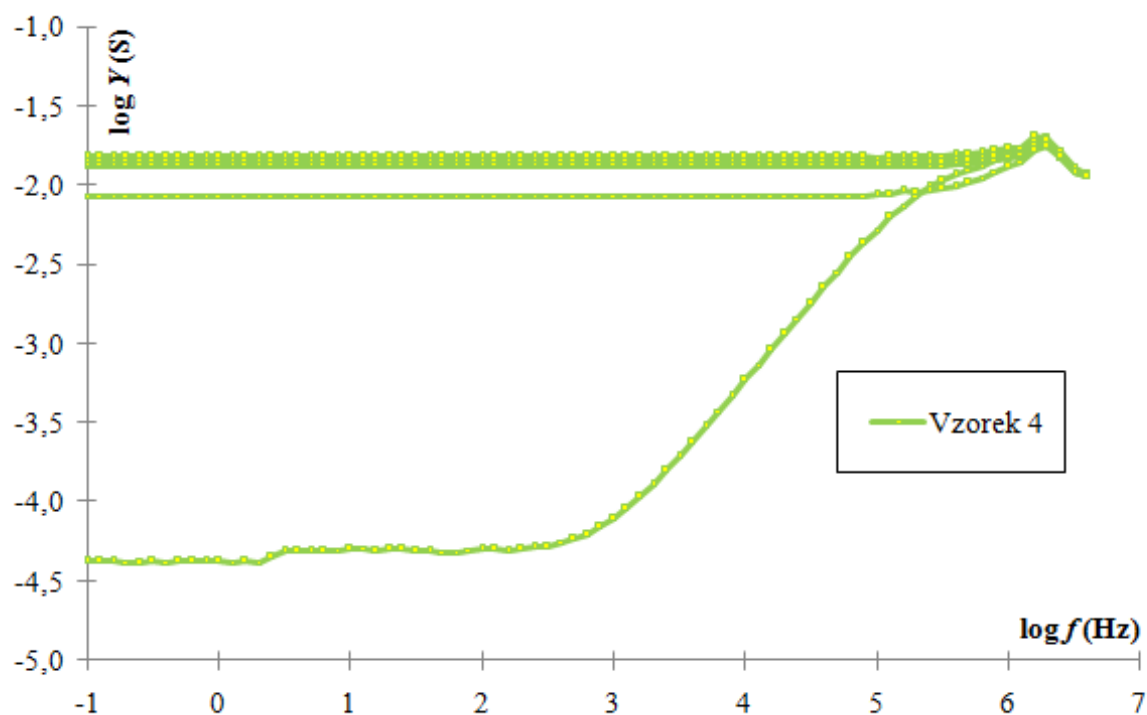
Na obrázku (Obr. 50) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku 4 viz tabulka (Tabulka 1) za tmy a na obrázku (Obr. 51) je uvedena závislost fáze na logaritmu frekvence téhož vzorku za tmy. V grafech jsou uvedeny závislosti všech kontaktů daného vzorku (celkem 6).

Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorku je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 2,5 Hz resp. 5,8 Hz, poté roste a na konci klesá. U závislosti fáze na logaritmu frekvence vzorku je také chování zprvu konstantní až do hodnoty přibližně 1,4 Hz resp. 4,6 Hz, poté roste a na konci klesá.

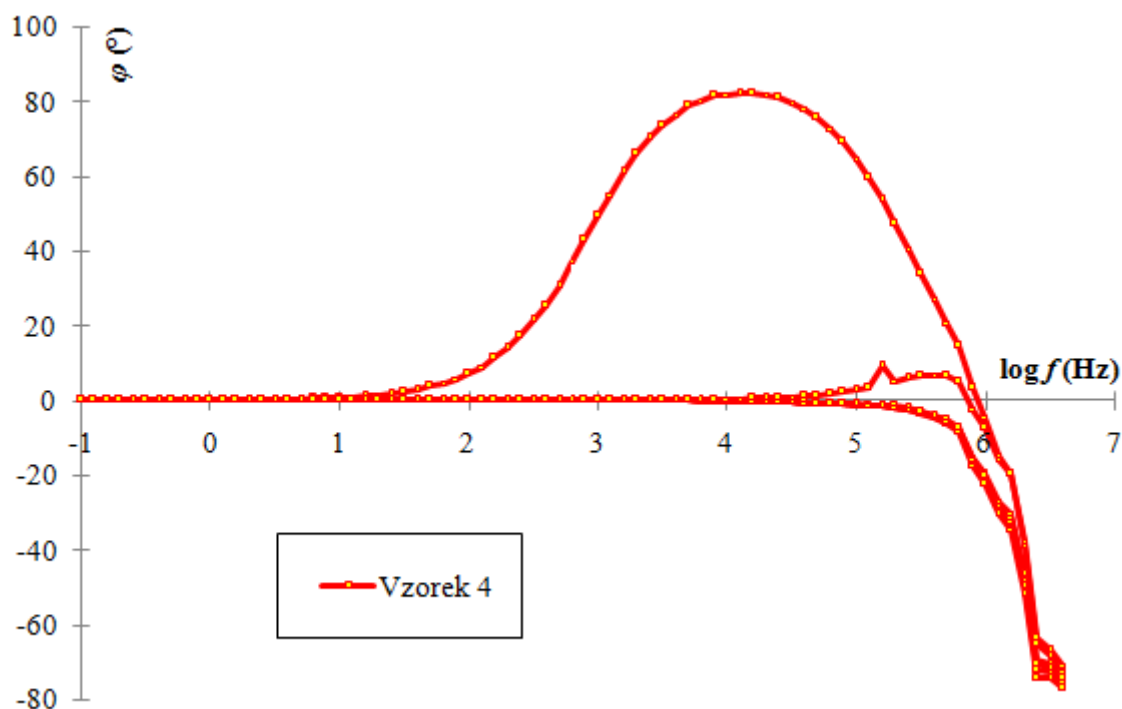
Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro  $0^\circ$  by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro  $90^\circ$  by to byl ideální kondenzátor). Z obrázku je zřejmé, že vzorek má nejprve ohmický charakter a následně přechází do kapacitního charakteru. Na konci křivky je zde náznak induktivního charakteru.

Při frekvencích vyšších než 6 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).

Jeden kontakt ve vzorku vykazuje velký odpor, což značí špatný kontakt. V grafech lze zmíněný kontakt poznat podle toho, že jako jediný vyčnívá ze sady. Ostatní kontakty vykazují v tomto případě konstantní chování v téměř celém rozsahu měření, jen ke konci zobrazené křivky klesají z důvodu použitého měřicího přístroje.



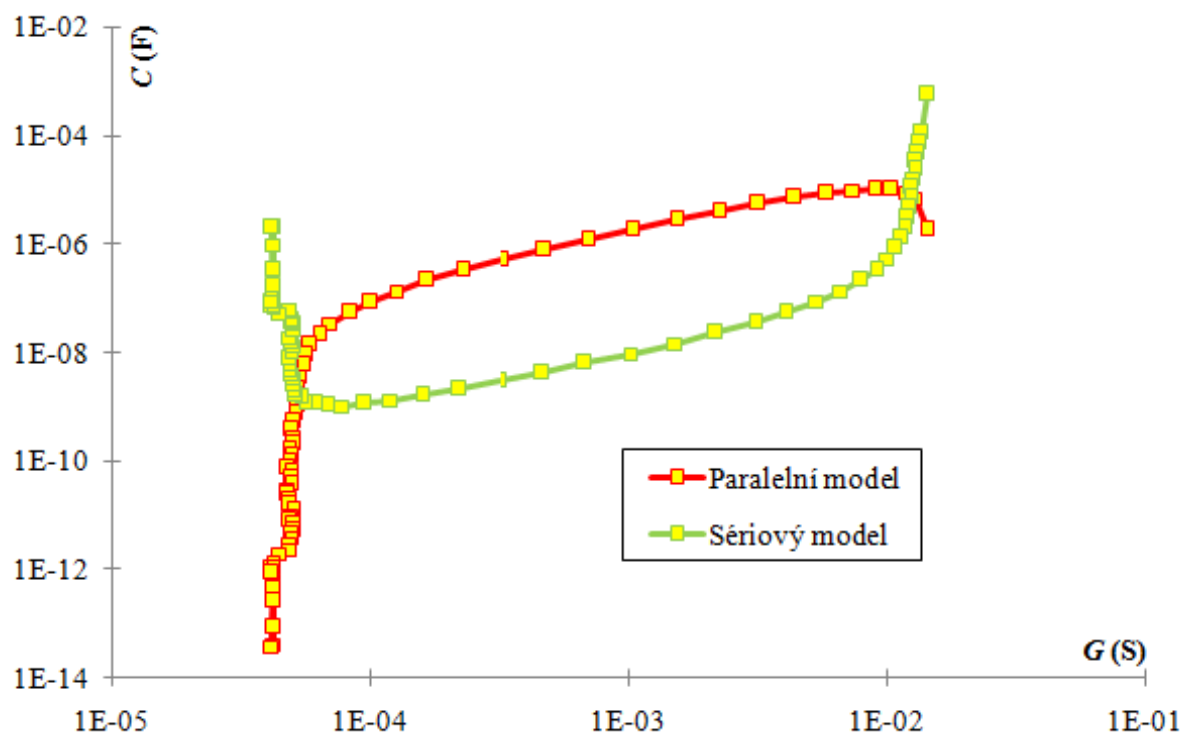
Obr. 50 Závislost vodivosti na frekvenci vzorku 4



Obr. 51 Závislost fáze na frekvenci vzorku 4

Na obrázku (Obr. 52) je uvedena závislost kapacity na vodivosti v logaritmicke mēřítku pro paralelní a sériový model vzorku 4, kontaktu c. Jedná se o tzv. „Modifikovaný Cole-Cole diagram“. Závislost paralelní i sériové vodivosti na frekvenci roste (pro nízké frekvence je vodivost  $4,2 \times 10^{-5}$  S, pro vysoké frekvence je  $2,5 \times 10^{-2}$  S). Pro vysoké frekvence má závislost induktivní

charakter. Místo průsečíku sériové a paralelní kapacity ( $8,4 \times 10^{-8} \text{ F}$ ) určuje kapacitní strukturu. Odchytky v závislosti jsou způsobeny přechodem mezi kapacitním a induktivním charakterem měřené soustavy.



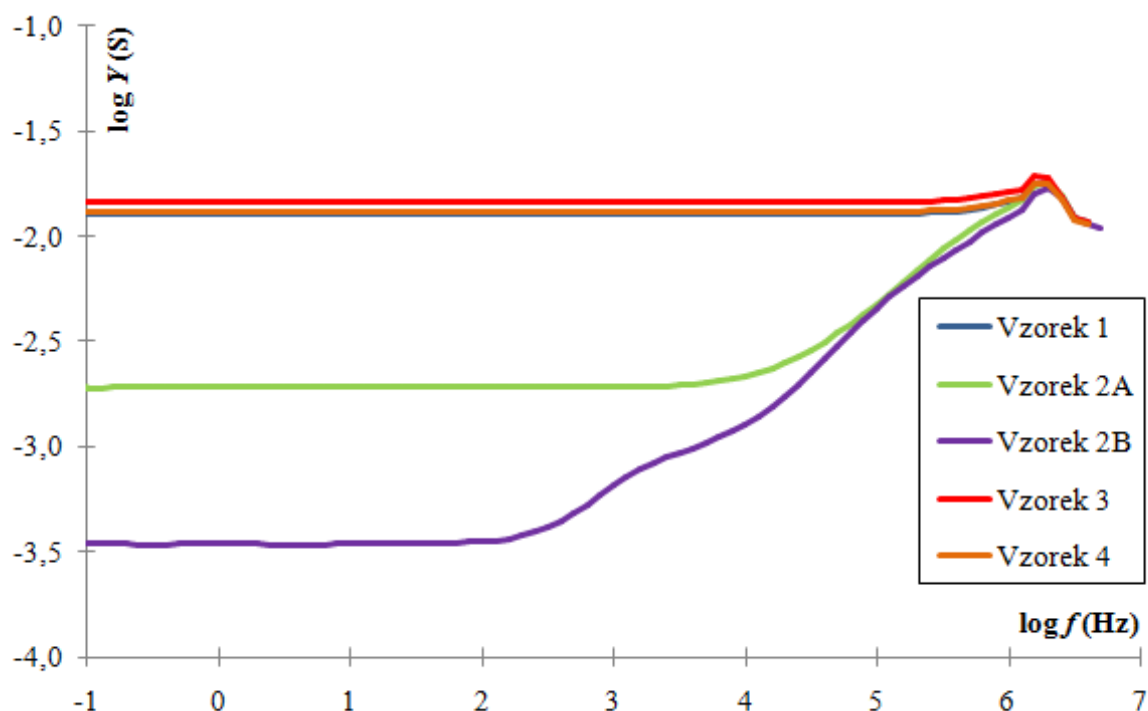
Obr. 52 Závislost kapacity na vodivosti v logaritmickém měřítku pro paralelní a sériový model vzorku 4, kontaktu c

Na obrázku (Obr. 53) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků 1, 2A, 2B, 3 a 4 viz tabulka (Tabulka 1) za tmy. V grafu jsou uvedeny závislosti kontaktů vzorků, které dosahovaly nejvyšších vodivostí vždy z jednotlivých sad vzorků.

Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 2 Hz (vzorek 2B) resp. 4 Hz (vzorek 2A), poté rostou a na konci klesají. Zbylé kontakty (vzorky 1, 3, 4) jsou konstantní po téměř celém měřeném rozsahu, jen ke konci zobrazené křivky klesají. Všechny vzorky tedy vykazují ohmický charakter.

Při frekvencích vyšších než 6 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).

Kontakt vzorku 3 vykazuje nejvyšší vodivost z měřených vzorků se sendvičovou strukturou (obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a neobsahuje vrstvu PEDOT:PSS). Naopak vzorek 2B vykazuje nejnižší vodivost (obsahuje aktivní vrstvu PdPc a obsahuje vrstvu PEDOT:PSS).



Obr. 53 Souhrnná závislost vodivosti na frekvenci vzorků se skleněným substrátem

#### 4.3.2 Impedanční spektroskopie gapových struktur

Na obrázku (Obr. 54) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků 5A, 5B, 6, 7, 8 a 9 viz tabulka (Tabulka 1) za tmy a na obrázku (Obr. 55) je uvedena závislost fáze na logaritmu frekvence týchž vzorků za tmy.

Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 5,8 Hz a poté klesá. U závislosti fáze na logaritmu frekvence vzorků je také chování zprvu konstantní až do hodnoty přibližně 4,2 Hz a poté také klesá.

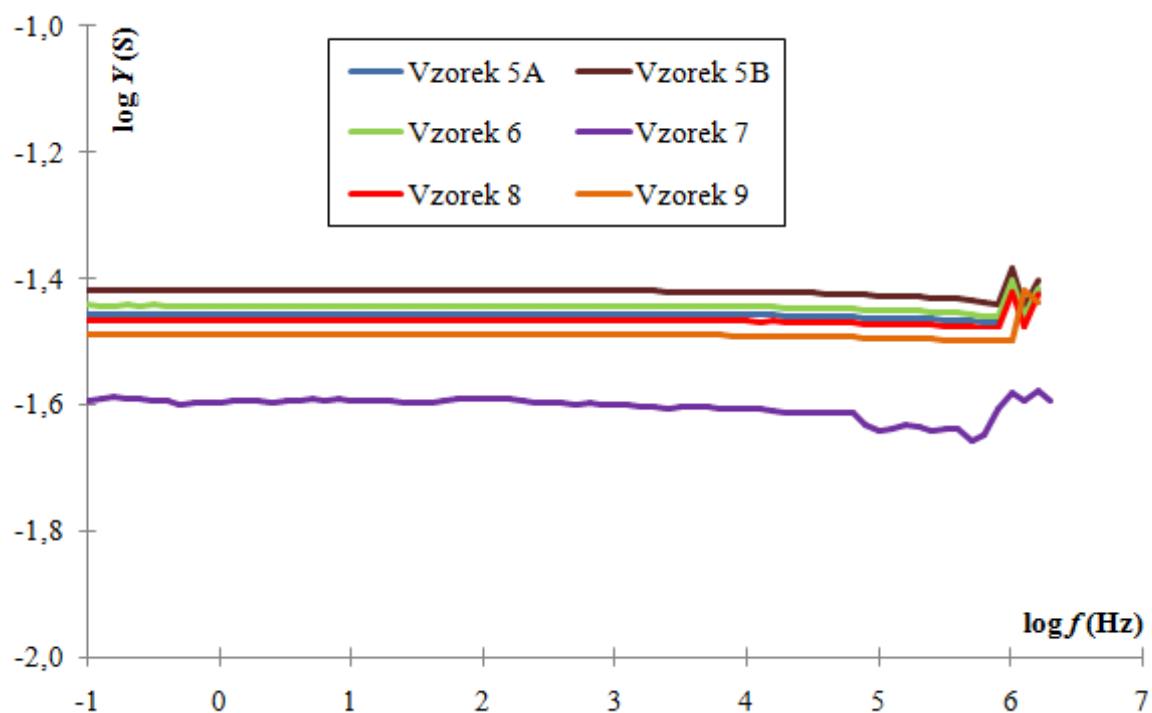
Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro  $0^\circ$  by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro  $90^\circ$  by to byl ideální kondenzátor). Z obrázku je zřejmé, že vzorek má ohmický charakter a na konci přechází do induktivního charakteru.

Vzorky s gapovou strukturou obsahují interdigitální elektrody, které vykazují ohmický charakter, tzn. že křivky jsou po téměř celou dobu měření konstantní. U gapových struktur se vždy proměřuje pouze jedna interdigitální elektroda.

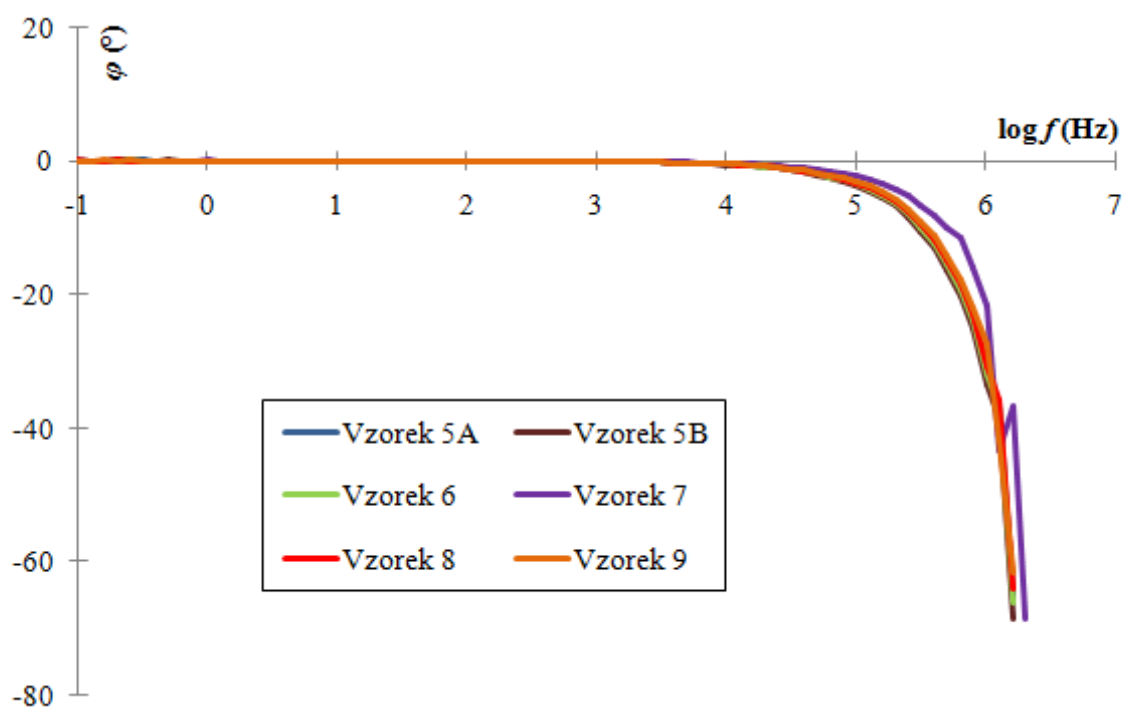
Při frekvencích vyšších než 4,2 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).

Kontakt vzorku 5B vykazuje nejvyšší vodivost z měřených vzorků s gapovou strukturou (obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a obsahuje vrstvu PMMA). Naopak vzorek 7 vykazuje nejnižší vodivost (obsahuje aktivní vrstvu PdPc a obsahuje vrstvu PMMA).





Obr. 54 Souhrnná závislost vodivosti na frekvenci vzorků s keramickým substrátem



Obr. 55 Souhrnná závislost fáze na frekvenci vzorků s keramickým substrátem

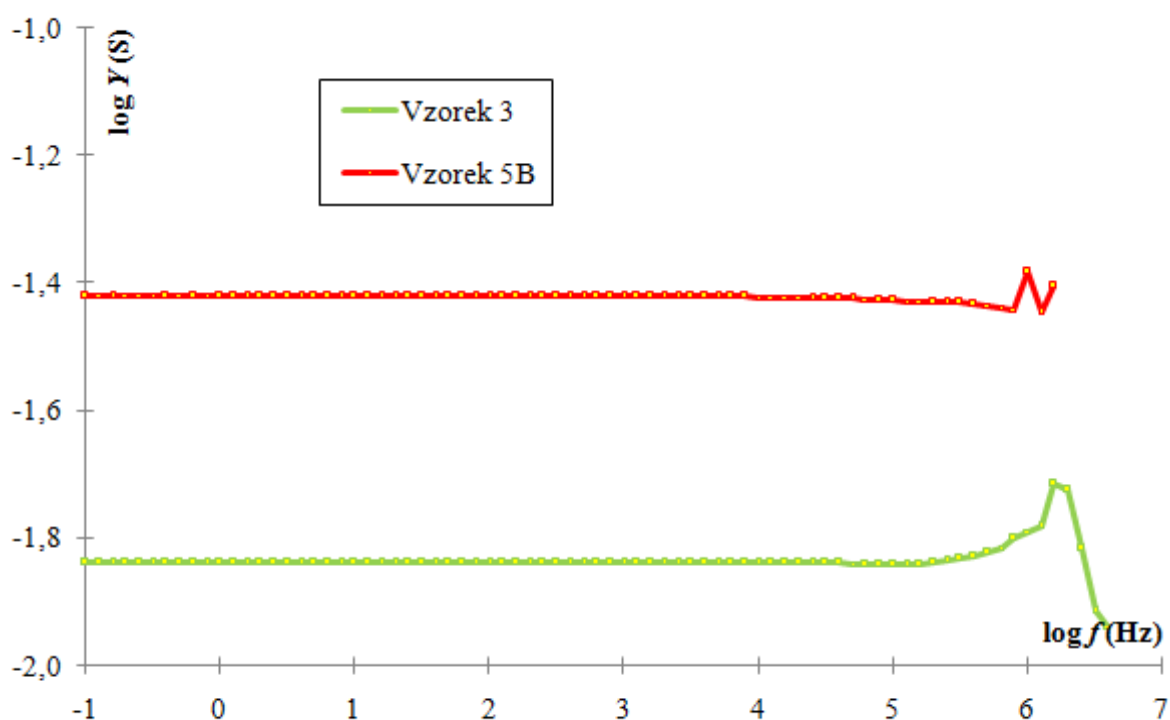
Na obrázku (Obr. 56) je uvedena závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků 3 a 5B viz tabulka (Tabulka 1) za tmy. Vzorek 3 je vybrán z důvodu nejlepších závislostí logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence v oblasti sendvičových struktur. Vzorek 5B je vybrán

pouze z důvodu nejvyšších závislostí v oblasti gapových struktur, které ovšem nevykazují fotovodivost ani fotobariéru.

Závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence vzorků je zprvu u všech kontaktů konstantní až do hodnoty kolem 5,5 Hz a poté roste a následně klesá, oba vzorky tedy vykazují ohmický charakter.

Při frekvencích vyšších než 6 Hz se začínají projevovat indukčnosti dané parametry použitého měřicího přístroje. Tyto měřené závislosti se projeví induktivním charakterem admitance (fáze je menší než  $0^\circ$ ).

Kontakt vzorku 5B s keramickým substrátem vykazuje nejvyšší vodivost z měřených vzorků (obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a obsahuje vrstvu PMMA). Vzorek 3 se skleněným substrátem vykazuje nižší vodivost (obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a neobsahuje další vrstvu). Ovšem vzorek 5B s nejvyšší vodivostí ze všech měřených vzorků není fotovodivý a nevykazuje fotovoltaiický jev z důvodu vnitřních interdigitálních elektrod (viz Obr. 42).



Obr. 56 Souhrnná závislost vodivosti na frekvenci vzorků 3 a 5B

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických materiálů, ze kterých jsou připraveny měřené struktury vzorků fotovoltaiických článků. Hlavními studovanými materiály jsou aktivní vrstvy PdPc (ftalocyaniny paladia) a PdPc + IL (ftalocyaniny paladia s přidavkem iontové kapaliny). Dále jsou studovány vlivy skleněné podložky a keramické podložky na měřené výsledky.

Teoretická část práce se zabývá rozdělením fotovoltaiických článků a fotovoltaiickou přeměnou v organických tenkých vrstvách článků. Dále je zde uvedena charakterizace článků i s nejpoužívanějšími materiály pro fotovoltaiické články a jejich strukturami. V neposlední řadě jsou v teoretické části probrány také metody nanášení tenkých vrstev.

V experimentální části práce je diskutován příklad výsledku z optické mikroskopie, výsledky volt-ampérových charakteristik a impedančních spekter připravených vzorků organických fotovoltaiických článků. V optické mikroskopii je uvedena mikrofotografie aktivní vrstvy PdPc při dvacetinásobném zvětšení (*Obr. 36*). Na uvedené mikrofotografii můžeme pozorovat strukturu vrstvy PdPc, která je zde v podobě nesymetrických krystalů, ale nezpůsobuje jakékoliv defekty vrstvy. Vrstva PdPc je po celém povrchu vzorku stejnoměrná a souvislá.

Z výsledků volt-ampérových charakteristik (*Obr. 43*) můžeme usoudit, že vzorek 3e se skleněným substrátem vykazuje nejvyšší výkon, nejnižší prahové napětí, nejvyšší fotovodivost a nejmenší odpor ze všech zkoumaných připravených vzorků. Vzorek 3e má sendvičovou strukturu, obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a neobsahuje další tenké vrstvy na skleněném substrátu. Vzorek 5B-a má sice nejvyšší vodivost ze všech měřených vzorků fotovoltaiických článků, ale nevykazuje fotovodivost, ani fotobariéru a také v tomto vzorku nepozorujeme žádný fotovoltaiický jev. Vzorek 5B-a má gapovou strukturu, obsahuje aktivní vrstvu PdPc + IL a tenkou vrstvu 5% PMMA na keramickém substrátu.

Nejvyšší fotovodivosti u volt-ampérových charakteristik tedy dosáhl vzorek 3e (*Obr. 41*). Nejvyšší fotovoltaiický jev u volt-ampérových měření byl pozorován u vzorku 4c (*Obr. 40*). A nejvyšší účinnost fotovoltaiické přeměny byla zjištěna u vzorku 2B-a (*Obr. 38*), kde účinnost dosáhla 0,28 %.

Také z výsledků impedančních spekter (*Obr. 53*) můžeme vyvodit, že vzorek 3 vykazuje nejvyšší fotovodivost ze všech připravených vzorků, přičemž jeho závislost logaritmu vodivosti na logaritmu frekvence je konstantní až do 5,5 Hz. Podobné vlastnosti vykazuje vzorek 5B s gapovou strukturou. U impedančních spekter jsou také uvedeny příklady „Modifikovaných Cole-Cole diagramů“ neboli závislosti kapacity na vodivosti v logaritmickém měřítku pro paralelní a sériové modely vzorků 1, 2A a 4 (např. *Obr. 46*).

Výsledky měření gapových struktur byly vždy stejné ať byla měření prováděna při osvětlení či za tmy. Výsledky byly totožné u volt-ampérových charakteristik (*Obr. 42*) i impedančních spekter (*Obr. 51, Obr. 52*). Gapové struktury tedy nevykazovaly fotovodivost, ani fotobariéru ani jsme u vzorků nepozorovali fotovoltaiický jev. Proto jsou, i přes velmi vysokou vodivost, pro nás zmíněné vzorky nedůležité.

Ze získaných volt-ampérových a impedančních výsledků jsme došli k závěru, že aktivní vrstva PdPc + IL výrazně zlepšuje zkoumané optoelektrické vlastnosti než samotná vrstva PdPc. Na zkoumané vlastnosti měl také vliv výběr substrátu (sklo, keramika), přidavná tenká vrstva 5% PMMA a vrstva PEDOT:PSS a také použité struktury (sendvič, gap) samotných vzorků fotovoltaiických článků. Přitom nejvýhodnější byla sendvičová struktura se skleněným substrátem a aktivní vrstvou PdPc + IL, bez dalších tenkých vrstev.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠEDINA, M. *Organické solární články pro fotovoltaickou přeměnu sluneční energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
- [2] Fotovoltaika. *IMAO electric: Fotovoltaické panely* [online]. 15.2.2010. [cit. 2014-08-23]. Dostupné z: <http://fotovoltaika-material.cz/>
- [3] Fotovoltaika. *Ray-on: Čistá energie budoucnosti* [online]. 2009. vyd. [cit. 2014-08-23]. Dostupné z: <http://ray-on.cz/solarni-energie/co-je-to-fotovoltaika/>
- [4] POSPÍŠIL, J. *Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 40 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [5] PETERA, J a J HEŘMAN. *Fotovoltaika* [online]. 30 s. [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Fotovoltaika.pdf>
- [6] FEJFAR, A. Fotovoltaika druhé a třetí generace. *Tzbinfo* [online]. 2001, 4.9.2006 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>
- [7] Technologie a vývoj PV modulů. *CZECH SOLAR: Solární panely – čistá energie ze slunce* [online]. Ostrava [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/technologie-a-vyvoj-panelu/>
- [8] Organic Photovoltaics: Changing The Landscape of Solar Power. *NANOFLEX: Power Corporation* [online]. 2014 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.nanoflexpower.com/organic>
- [9] Organic Photovoltaics. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/opv-tutorial.html>
- [10] BERNÉDE, J C. Organic photovoltaic cells: History, principle and techniques. In: *Journal of the Chilean Chemical Society*. Francie, 2007, s. 1549-1564. ISSN 0717-9707. Dostupné z: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-97072008000300001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-97072008000300001&script=sci_arttext)
- [11] VANMAELE, L. Conducting Polymer Materials for Flexible OPV Applications: Orgacon<sup>TM</sup> PEDOT:PSS. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/agfa-opv.html>
- [12] PEACH, M. IMEC achieves 8,4% conversion in fullerene-free organic PV cell: while Vienna University of Technology creates photo-diode from tungsten diselenide. *The business of photonics: Daily coverage of the optics & photonics industry and the markets that it serves* [online]. 2014, 2014 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://optics.org/news/5/3/18>
- [13] Polymer solar cell reaches 11,5% efficiency: Triple-junction device developed by UCLA research team suggests that more efficiency gains are within reach. *The business of photonics: Daily coverage of the optics & photonics industry and the markets that it serves* [online]. 2014, 2014 [cit. 2014-08-24]. Dostupné z: <http://optics.org/news/5/7/43>

- [14] MAYER, A, S SCULLY, B HARDIN, M ROWELL a M MCGEHEE. Polymer-based solar cells. *Materials Today* [online]. 2007, vol. 10, issue 11, s. 28-33 [cit. 2014-08-25]. DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70276-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702107702766>
- [15] DENEKAMP, M. Organic Photovoltaics For Cheap Highly Effective Solar Power. DENEKAMP, M. *Alternative Energy Action Now* [online]. 23.9.2014 [cit. 2014-09-24]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-action-now.com/organic-photovoltaics.html>
- [16] KNIER, G. How do Photovoltaics Work? *National Aeronautics and Space Administration: NASA Science – Science News* [online]. 1996, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>
- [17] FLORIÁN, P. *Elektrické a dielektrické vlastnosti organických materiálů pro fotovoltaické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [18] Photovoltaic Effect: An Introduction to Solar Cells. FLORIDA STATE UNIVERSITY. *Energy & Sustainability Center: What is Sustainable Energy?* [online]. Tallahassee, 2006 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECS2005/SuntoSolar.pdf>
- [19] HONSBURG, C a S BOWDEN. Efficiency. HONSBURG, C a S BOWDEN. *Photovoltaic Education Network: A collection of resources for the photovoltaic educator*. [online]. 3.9.2014 [cit. 2014-09-24]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/efficiency>
- [20] NELSON, J. *The physics of solar cells* [online]. 5. vyd. London: Imperial College Press, 2003, s. 25 [cit. 2014-08-25]. ISBN 1-86094-340-3. Dostupné z: <http://www.barnesandnoble.com/sample/read/9781848168237>
- [21] HONSBURG, C a S BOWDEN. Open-Circuit Voltage. HONSBURG, C a S BOWDEN. *Photovoltaic Education Network: A collection of resources for the photovoltaic educator*. [online]. 3.9.2014 [cit. 2014-09-24]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [22] HONSBURG, C a S BOWDEN. Short-Circuit Current. HONSBURG, C a S BOWDEN. *Photovoltaic Education Network: A collection of resources for the photovoltaic educator*. [online]. 3.9.2014 [cit. 2014-09-24]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
- [23] HONSBURG, C a S BOWDEN. Fill Factor. HONSBURG, C a S BOWDEN. *Photovoltaic Education Network: A collection of resources for the photovoltaic educator*. [online]. 3.9.2014 [cit. 2014-09-24]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
- [24] MIKLÍKOVÁ, Z. *Studium elektrických a dielektrických vlastností tenkých polymerních vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 58 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [25] Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl). *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/445703?lang=en&region=CZ>

- [26] PCBTDP. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/1754048?lang=en&region=CZ>
- [27] PCDTBT. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/753998?lang=en&region=CZ>
- [28] Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene]. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/546461?lang=en&region=CZ>
- [29] LI, C. SOLARMER. *Solarmer Organic Optoelectronic Materials: ZOOM Catalog 2014 – Third Season* [online]. 3. vyd. El Monte, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.solarmer.com/downloads/ZOOM%20Catalog%202014.pdf>
- [30] YI-MING, C a Z RUI. INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE. *Carrier transport material and electronic device* [patent]. Taiwan. Přihláška, US 20130320304 A1. Uděleno 13.8.2012. Zapsáno 29.5.2012. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20130320304>
- [31] JIANHUA, L a N THUC-QUYEN. Optoelectronic Devices Based on Diketopyrrolopyrrole (DPP)-containing Conjugated Small Molecules. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/optoelectronic-devices.html>
- [32] ABRAHART, E N. Dye: Phthalocyanine compounds. In: *Encyclopaedia Britannica: Digital innovation* [online]. 2014, 2.9.2014 [cit. 2014-09-25]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/174980/dye/277841/Phthalocyanine-compounds>
- [33] LIŠKOVÁ, M. *Syntézy za neklasických podmínek*. E-Learningový kurs [online]. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 2008, s. 102-124 [cit. 2014-08-15]. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Pavel Pazdera, CSc. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/77987/prif\\_m/Iontove\\_kapaliny.pdf](http://is.muni.cz/th/77987/prif_m/Iontove_kapaliny.pdf)
- [34] HANUSEK, J. Iontové kapaliny – Nový směr v "zelené" chemii. In: *Chemické listy*. Praha: Česká společnost chemická, 2005, s. 265-267. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://chemicke-listy.cz/Bulletin/bulletin362/bulletin362.pdf>
- [35] STENGER-SMITH J D a J A IRVIN. Ionic Liquids for Energy Storage Applications. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2009, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/ionic-liquids-for.html>
- [36] 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/711691?lang=en&region=CZ>
- [37] 1-Butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/711772?lang=en&region=CZ>
- [38] 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/711748?lang=en&region=CZ>

- [39] 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/fluka/04365?lang=en&region=CZ>
- [40] 1-Butyl-1-methylpyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/fluka/40963?lang=en&region=CZ>
- [41] LHOTÁK, P. Chemie Fullerenů. *ÚOCHB AV ČR: Ústav Organické Chemie a Biochemie AV ČR* [online]. 2004, s. 28 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: [http://www.uochb.cas.cz/Zpravy/PostGrad2004/7\\_Lhotak.pdf](http://www.uochb.cas.cz/Zpravy/PostGrad2004/7_Lhotak.pdf)
- [42] Poly(methyl methacrylate). *SIGMA-ALDRICH* [online]. St. Louis, 2014 [cit. 2014-08-25]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/182230?lang=en&region=CZ>
- [43] DŽUGAN, T. *Senzory par a plynů na bázi ftalocyaninů* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2012. 115 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2658/pdf\(2\).Disertace\\_Dzukan.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2658/pdf(2).Disertace_Dzukan.pdf?sequence=1)
- [44] Spin Coat theory. *Brewer science* [online]. 1997, s. 6, 2014 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: <http://www.brewerscience.com/uploads/equipment/datasheets/spintheory.pdf>
- [45] BINDA, M. Deposition and patterning techniques for Organic Semiconductors. *Politecnico di Milano: Organic Electronics – principles, devices and applications* [online]. 2011, s. 25, 2013 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: <http://home.deib.polimi.it/sampietr/ESO/OK-06-Binda-DepTechniques.pdf>
- [46] Dimatix Materials Printer DMP-2831. *FUJIFILM: Value from Innovation* [online]. USA, 2014 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: [http://www.fujifilmusa.com/products/-industrial\\_inkjet\\_printheads/deposition-products/dmp-2800/](http://www.fujifilmusa.com/products/-industrial_inkjet_printheads/deposition-products/dmp-2800/)
- [47] BERNI, A, M MENNIG a H SCHMIDT. DOCTOR BLADE. *Sci Dok: Universität des Saarlandes* [online]. s. 4 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3076/pdf/sm200405.pdf>
- [48] Electrophoretic Deposition (EPD). *KU Leuven* [online]. Belgie, 2010 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/EPD>

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A$	ampér, jednotka proudu
$Al$	chemická značka pro hliník
$AlPc$	ftalocyanin hliníku
$A_{OX}$	oxidační potenciál donoru
$b$	napierův koeficient
$B$	susceptance
$B_p$	paralelní susceptance
$BMIM\ Otf$	1-butyl-3-metylimidazolium trifluorometansulfonát
$BMIMBF_4$	1-butyl-3-metylimidazolium tetrafluoridboritý
$C$	elektrická kapacita kondenzátoru
$CHCl_3$	chloroform
$CIS$	jedná se o strukturu prvků Cu, In, Ga, S, Se
$Co$	chemická značka pro kobalt
$CO$	oxid uhelnatý
$CO_2$	oxid uhličitý
$cm^{-1}$	reciproký centimetr, jednotka absorpčního koeficientu
$Cu$	chemická značka pro měď
$CuPc$	ftalocyanin mědi
$d$	šířka bariéry
$D$	ztrátový faktor
$DPP$	diketo-pyrrolo-pyrroly
$DSSC$	barvivové články, (dye sensitized solar cells)
$e$	elektron
$e$	jednotkový náboj
$E_B$	výška bariéry, energie
$E_C$	energie vodivostního pásu
$E_{FC}$	energie elektronové kvazi-Fermiovy hladiny
$E_{FV}$	energie děrové kvazi-Fermiovy hladiny
$EMIM\ TFSI$	1-etyl-3-metylimidazoliumbis(trifluormetylsulfonyl)imid
$EMIMBF_4$	1-etyl-3-metylimidazolium tetrafluoridboritý
$E_{red(A)}$	redukční potenciál akceptoru
$E_V$	energie valenčního pásu
$eV$	elektronvolt, jednotka energie
$f$	frekvence střídavého proudu
$F_8T_2\text{-PCBM}$	derivát polythiofenu s fullerenem
$Fe$	chemická značka pro železo



FET	polem řízený tranzistor
$FF$	faktor plnění
$G$	konduktance
Ga	chemická značka pro gallium
$G_P$	paralelní konduktance
g/mol	jednotka molární hmotnosti
h	díra
H <sub>2</sub>	molekula vodíku
HCl	kyselina chlorovodíková
HOMO	nejvyšší obsazený molekulový orbital
$I$	procházející proud
$I_0$	saturační proud
In	chemická značka pro indium
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	směsný oxidu india a cínu
$I_{SC}$	proud nakrátko
IS	impedanční spektroskopie
ITO	směsný oxidu india a cínu
$I_V$	vstupní proud
j	imaginární jednotka
$k_B$	Boltzmanova konstanta
$k_B T/q$	teplotní potenciál
$l$	hustota světelného toku ve vzdálenosti $x$ od místa, kde světlo vstupuje do látky
$L$	indukčnost cívky
LCD	displej z tekutých krystalů
LiF	fluorid litný
LUMO	nejnižší neobsazený molekulový orbital
$M$	faktor vyjadřující spektrální nesoulad mezi výstupním spektrem solárního simulátoru a standardním AM1.5 spektrem
MDMO-PPV	poly[2-metoxy-5-(3',7'-dimetyloctyloxy)-1,4-fenylenvinylen]
MDMO-PPV-PCBM	poly[2-metoxy-5-(3',7'-dimetyloctyloxy)-1,4-fenylenvinylen] s fullerenem
Me	centrální atom
MEH-PPV	Poly[2-metoxy-5-(2-etylhexyloxy)-1,4-fenylenvinylen]
$M_n$	průměrná molární hmotnost
Mn	chemická značka pro mangan
mV	milivolt, jednotka napětí
M*	molekula v excitovaném stavu
m-Si	monokrystalický křemík

$n$	faktor ideality diody
$N_C$	efektivní hustota energetického stavu vodivostního pásu
$n_e$	elektronová hustota
$n_h$	děrová hustota
Ni	chemická značka pro nikl
NiPc	ftalocyanin niklu
nm	nanometr, jednotka délky
$N_V$	efektivní hustota energetického stavu valenčního pásu
n-typ	typ polovodiče, kde majoritní nosiče náboje jsou elektrony
O <sub>2</sub>	molekula kyslíku
OFET	polem řízený organický tranzistor
OLED	světlo emitující organická dioda
P <sub>3</sub> HT	poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl)
P <sub>3</sub> HT-PCBM	poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) s fullerenem
PBDTTT-C	poly[(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-benzo(1,2-b:4,5-b')dithiofen)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiofen-)-2,6-diyl]
PC <sub>71</sub> BM	[6,6]-fenyl C71 metyl ester kyseliny butarové
PCBM	1-[3-(metoxykarbonyl)propyl]-1-fenyl-[6,6]C61
PCBTDP	poly[N-90-heptadecanyl-2,7karbazol-alt-3,6-bis(thiofen-5-yl)-2,5-dioctyl-2,5-dihydropyrol[3,4]pyrol-1,4-dion]
PCDTBT	poly[N-9'-heptadekanyl-2,7-karbazol-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazol)], Poly[[9-(1-octylonyl)-9H-karbazol-2,7-diyl]-2,5-thiofendiyl-2,1,3-benzothiadiazol-4,7-diyl-2,5-thiofenediyl]
<i>PCE</i>	účinnost fotovoltické přeměny
Pd	chemická značka pro paladium
PDHEOPV-PCBM	poly-p-fenylenvinylen s fullerenem
PdPc	ftalocyanin paladia
PdPc/IL	ftalocyanin paladia s iontovou kapalinou (ionic liquid)
PEDOT:PSS	směs polymerů, poly(3,4-etylendioxythiofen)-poly(4-styrensulfonyl)
pH	logaritmická stupnice kyselosti, neutrální pH mají látky rovné 7
$P_{IN}$	vstupní výkon záření solárního simulátoru
PLED	světlo emitující polymerní dioda
$P_{light}$	výkon dopadajícího záření
PMMA	polymethylmetakrylát
$P_{OUT}$	výstupní výkon fotovoltického článku
PPV	poly-p-fenylenvinylen
p-i-n	polovodič typu P, izolant I, polovodič typu N
p-Si	polykrystalický křemík
p-typ	typ polovodiče, kde majoritní nosiče náboje jsou díry

$R$	rezistance
$R_p$	paralelní odpor
rpm	„revolutions per minute“ nebo také otáčky za minutu, jednotka frekvence
$R_s$	sériová rezistance (sériový odpor)
$S$	chemická značka pro síru
$S_0$	základní stav molekuly
$S_1$	singletový excitovaný stav
$S_2$	singletový excitovaný stav
$S_1, S_2, S_3, S_4$	korelační konstanty
$Se$	chemická značka pro selen
$T$	termodynamická teplota
$T_1$	tripletový excitovaný stav
THF	tetrahydrofuran
$TiO_2$	oxid titaničitý
t-CH <sub>x</sub>	trans-polyetylén
$U$	vstupní napětí
$U_{oc}$	napětí naprázdno
UV záření	ultrafialové záření
VA	volt-ampérová charakteristika
$W_p$	instalovaný výkon článku
$WSe_2$	selenid wolframičitý
$W/m^2$	watt na metr čtverečný, jednotka intenzity ozáření
$X$	reaktance
$X_C$	kapacitance
$X_L$	induktance
$X_s$	sériová reaktance
$Z$	impedance
$Zn$	chemická značka pro zinek
$ZnPc$	ftalocyanin zinku
$\mu$	pohyblivost nosičů náboje
$\mu l$	mikrolitr, jednotka objemu
$\mu m$	mikrometr, jednotka délky
$\varphi$	fázový posun
$\varphi_{M1}$ a $\varphi_{M2}$	výstupní práce katody
$\omega$	fázová rychlost
$(n) h\nu$	(vícefotonové) světlo